# FRANÇOIS JACOB

# LA LOGICA DE LO VIVIENTE

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

François Jacob

# La lógica de lo viviente

**Una visión materialista de la biología**

**SALVAT**

Título original: *La logique du vivant*
François Jacob, 1970

Traducción: Joan Senent & M. Rosa Soler

*Adaptado del ePub de Titivillus*
*Esta edición: Sargont (2018)*

# Índice

# Prefacio

Una época o una cultura se caracterizan no tanto por la extensión de los conocimientos adquiridos como por las preguntas que se plantean. Este libro es una historia de las preguntas formuladas en relación a la herencia, más que de las respuestas que se han ofrecido. Es la historia de los esfuerzos que han llevado a la formulación de nuevas preguntas o, más bien, a la reformulación de preguntas clásicas. A través de esta interrogación constantemente replanteada durante los últimos cuatro siglos, vemos cómo se transforma paulatinamente nuestra concepción de la vida y del ser humano, y cómo las respuestas dejan de ser objeto de revelación divina para convertirse en temas de investigación.

En contra de lo que suele creerse, lo importante en la ciencia no son tanto sus productos como su espíritu. Tan importante como el resultado, por novedoso que sea, es la apertura, la primacía de la crítica, el sometimiento a lo imprevisto, por muy contrario a lo esperado que parezca. Hace mucho tiempo que los científicos han renunciado a la idea de una verdad última e intangible, imagen precisa de una realidad que estaría esperando que se la descubra a la vuelta de una esquina. Ahora ya saben que tienen que conformarse con lo parcial y lo provisional. Esta gestión precede muchas veces al hallazgo de la pendiente natural para la mente humana, que requiere unidad y coherencia en su representación del mundo bajo sus más variados aspectos. De hecho, este conflicto entre lo universal y lo local, entre lo eterno y lo provisional, vuelve a aparecer periódicamente en determinadas polémicas. Por ejemplo, la que enfrenta de nuevo, con los mismos argumentos de que se valían Huxley y Wilberforce o Agassiz y Gray, a los partidarios de la creación contra los de la evolución. Los primeros hallan constantemente en el más nimio detalle de la naturaleza la señal inequívoca que demuestra la conclusión a la que nadie puede dejar de suscribirse. Los segundos buscan interminablemente en esa misma naturaleza las trazas —muchas veces ausentes— de acontecimientos que permitan reconstruir lo que quieren que sea, no ya un mito, sino una historia, una teoría evolutiva. Este diálogo de sordos enfrentará

eternamente a quienes rechazan una visión del mundo universal e impuesta y quienes no pueden prescindir de ella.

De unos años a esta parte los científicos son objeto de muchos reproches. Se les acusa de no tener corazón ni conciencia, de no interesarse por el resto de la humanidad, y hasta de ser unos individuos peligrosos que no vacilan en desarrollar — y utilizar— medios terribles de destrucción y coerción. Esto es alabarles demasiado. La proporción de imbéciles y malvados es una constante en todas las muestras de población, tanto entre los científicos como entre los agentes de seguros, los escritores, los campesinos, los sacerdotes o los políticos. A pesar del Dr. Frankenstein o el Dr. Strangelove, las catástrofes de la historia se deben menos a los científicos que a los clérigos y los políticos.

Porque no es únicamente el interés lo que hace que los hombres se maten entre ellos. También es el dogmatismo. No hay nada tan peligroso como la certeza de estar en posesión de la verdad. No hay nada que cause tanta destrucción como la obsesión por una verdad considerada como absoluta. Todos los grandes crímenes de la historia son consecuencia de algún fanatismo. Todas las masacres se han perpetrado en nombre de la virtud, de la religión verdadera, del nacionalismo legítimo, de la política idónea, de la ideología justa; en resumen, en el nombre del combate contra la verdad de los otros, del combate contra Satán. La frialdad y la objetividad que tan a menudo se reprochan a los científicos quizá serían más convenientes que el acaloramiento y la subjetividad a la hora de tratar algunos asuntos humanos. Pues no son las ideas de la ciencia las que engendran pasiones: son las pasiones las que utilizan la ciencia para respaldar su causa. La ciencia no conduce al racismo y el odio. Es el odio el que acude a la ciencia para justificar su racismo. Se les puede reprochar a algunos científicos la vehemencia con que algunas veces defienden sus ideas. Pero todavía no se ha perpetrado ningún genocidio para imponer teoría científica alguna. En las postrimerías del siglo XX, todo el mundo debería tener claro que no habrá ningún sistema que pueda explicar el mundo en todos sus aspectos y en todos sus detalles. Haber contribuido a desbaratar la idea de una verdad intangible y eterna quizá no sea el menor de los títulos de gloria de la gestión científica.

# Introducción: El programa

Pocos fenómenos se manifiestan con tanta evidencia en el mundo de lo viviente como la generación de semejantes a partir de otros semejantes. El niño se da cuenta en seguida de que el perro nace del perro y el trigo del trigo. Desde muy pronto, el hombre ha sabido interpretar y explotar la permanencia de las formas a través de las generaciones. Cultivar plantas, criar animales, introducir mejoras para hacerlos comestibles o domésticos supone haber adquirido ya una larga experiencia. Supone hacerse ya una determinada idea de la herencia para usarla en provecho propio puesto que, para obtener buenas cosechas, no basta con esperar la luna llena ni con hacer sacrificios a los dioses antes de la siembra; es preciso, además, saber elegir entre las diversas variedades de la planta que se cultiva. A los agricultores prehistóricos les ocurría algo así como al personaje de Voltaire que se jactaba de aniquilar a sus enemigos gracias a una adecuada mezcla de oraciones, encantamientos y arsénico.

Quizá sea en el mundo de lo viviente donde haya resultado más difícil separar el arsénico de los encantamientos. Incluso una vez establecidas en el mundo físico las virtudes del método científico, los estudiosos del mundo de lo viviente todavía consideraron durante varias generaciones el origen de los seres en función de creencias, anécdotas y supersticiones. Basta con una experimentación relativamente simple para descartar la generación espontánea o las hibridaciones imposibles, y sin embargo, bajo una u otra forma, hasta el siglo XIX persistieron ciertos aspectos de los viejos mitos sobre los que se fundaba el origen del hombre, de los animales y de la Tierra.

Hoy en día la herencia se describe en términos de información, mensajes y código. La reproducción de un organismo se ha transformado en la de las moléculas que lo constituyen. No debido a que cada especie química posea la capacidad de producir copias de sí misma, sino a que la estructura de las macromoléculas está determinada hasta el último detalle por secuencias de cuatro radicales químicos contenidos en el patrimonio genético. Lo que se transmite de generación en generación son las «instrucciones» que especifican las estructuras moleculares. Son los planos

arquitectónicos del futuro organismo. Son también los medios de poner en práctica estos planos y de coordinar las actividades del sistema. Así pues, cada huevo contiene en los cromosomas recibidos de sus padres todo su propio futuro, las etapas de su desarrollo, la forma y las propiedades del ser que de allí surgirá. El organismo se convierte así en la realización de un programa prescrito por la herencia. La traducción de un mensaje sustituye a la intención de una Psique. Desde luego que el ser viviente representa la ejecución de un diseño, pero sin que éste haya sido concebido por inteligencia alguna. Tiende hacia un objetivo, pero sin que voluntad alguna lo haya decidido. El objetivo es preparar un programa idéntico para la generación siguiente. Es reproducirse.

Un organismo no es sino una transición, una etapa entre lo que fue y lo que será. La reproducción constituye a la vez el origen y el fin, la causa y el objetivo. Con el concepto de programa aplicado a la herencia, desaparecen ciertas contradicciones que la biología había resumido en una serie de oposiciones: finalidad y mecanismo, necesidad y contingencia, estabilidad y variación. En la idea de programa se vienen a fundir dos nociones que la intuición había asociado con los seres vivos: la memoria y el proyecto. Por memoria se entiende el recuerdo de los padres que la herencia traza en el hijo. Por proyecto, el plan que dirige hasta el último detalle la formación de un organismo. En torno a estos dos temas ha girado un buen número de controversias. En primer lugar en relación con la herencia de los caracteres adquiridos. La idea de que el medio condiciona la herencia representa una confusión, intuitivamente natural, entre dos tipos de memoria, la genética y la nerviosa. Se trata de una vieja historia, puesto que la Biblia ya hace mención de ella. Para evitar más malentendidos con su suegro, Jacob trata de crear rebaños fáciles de reconocer por las manchas y rayas en la lana de sus componentes. Coge ramas de los árboles, las descorteza dejando lo blanco al descubierto y las coloca allí donde se aparean los animales al ir a beber: «Se apareaban a la vista de la ramas y parían crías rayadas y manchadas». A través de los siglos se han venido repitiendo hasta el infinito experiencias de este tipo, sin haber alcanzado jamás éxitos semejantes. Para la biología moderna, lo que caracteriza principalmente a los seres vivos es su capacidad de conservar la experiencia pasada y transmitirla. Los dos puntos de ruptura de la evolución, primero la aparición de la vida y luego la del

pensamiento y el lenguaje, corresponden cada uno a la aparición de un mecanismo memorístico, el de la herencia y el del cerebro. Entre ambos sistemas hay ciertas analogías. En primer lugar, porque ambos han sido seleccionados para acumular la experiencia pasada y para transmitirla.

En segundo lugar porque la información registrada no se perpetúa más que en la medida en la que se reproduce en cada generación. Pero se trata de dos sistemas diferentes, tanto por su naturaleza como por la lógica de sus operaciones. Por su flexibilidad, la memoria nerviosa se presta particularmente bien a la transmisión de los caracteres adquiridos, mientras que la herencia, en razón de su rigidez, se opone a ello.

El programa genético, en efecto, está constituido por una combinatoria de elementos esencialmente invariantes. Por su estructura misma, el mensaje de la herencia no permite la menor intervención concertada del exterior. Ya sean químicos o mecánicos, todos los fenómenos que contribuyen a la variación de organismos o poblaciones se producen en total ignorancia de sus efectos. Sobrevienen sin conexión alguna con las necesidades del organismo para adaptarse. En una mutación hay «causas» que modifican un radical químico, rompen un cromosoma, invierten un segmento de ácido nucleico, pero en ningún caso puede haber ahí correlación entre causa y efecto. Esta contingencia no se limita solamente a las mutaciones, sino que se aplica a cada una de las etapas a través de las cuales se constituye el patrimonio genético de un individuo: la segregación de los cromosomas, su recombinación, la elección de los gametos que participan en la fecundación e incluso, en gran medida, la de las parejas sexuales. En ninguno de estos fenómenos existe la menor conexión entre un hecho particular y su resultado. Para cada individuo el programa resulta de una cascada de acontecimientos, todos ellos contingentes. La naturaleza misma del código genético prohíbe cualquier cambio deliberado en el programa por influencia propia, del medio o de los productos de su expresión. El programa no aprende de la experiencia. En cuanto al proyecto, también se trata de una noción que la intuición ha asociado desde hace mucho tiempo con el organismo. Mientras el mundo viviente representaba, por así decirlo, un sistema de regulación externa, mientras era dirigido desde el exterior por un poder soberano, ni el origen ni la finalidad de los seres vivos planteaban dificultades; simplemente coincidían con los del universo. Pero tras la constitución de una física a

comienzos del siglo XVII, el estudio de los seres vivos se encontró con una contradicción. A partir de entonces no ha hecho más que crecer la oposición entre, por un lado, la interpretación mecanicista del organismo y, por otro, la evidente finalidad de ciertos fenómenos como el desarrollo de un huevo hasta convertirse en un organismo adulto o el comportamiento de un animal. Claude Bernard resume así este contraste: «Admitiendo que los fenómenos vitales se relacionan con manifestaciones fisicoquímicas, lo cual es cierto, la cuestión en conjunto no queda aclarada por ello; porque no es un encuentro fortuito de fenómenos fisicoquímicos el que construye a cada ser según un plan y siguiendo un diseño fijados y previstos de antemano… Los fenómenos vitales tienen sus condiciones fisicoquímicas rigurosamente determinadas, pero al mismo tiempo se subordinan y se suceden en un encadenamiento y según una ley, ambos fijados de antemano: se repiten eternamente, con orden, regularidad, constancia, y se armonizan con vistas a obtener un resultado que es la organización y el crecimiento del individuo, animal o vegetal. Es como si hubiera un diseño preestablecido de cada ser y de cada órgano, de suerte que, si bien cada fenómeno de la economía es tributario de las fuerzas generales de la naturaleza cuando se considera aisladamente, cuando se consideran sus relaciones con los otros revela un vínculo especial, parece que algún guía invisible lo hubiera conducido hasta el lugar que ocupa y lo dirigiera por la ruta que sigue»[1]. Hoy en día no es necesario cambiar ni una sola letra de estas líneas. No hay ni una sola frase que la biología moderna no pueda asumir. Sencillamente, con la descripción de la herencia como un programa cifrado en una secuencia de radicales químicos, la contradicción ha desaparecido.

En un ser vivo todo está dispuesto con vistas a la reproducción. Una bacteria, una ameba, un helecho, ¿con qué destino pueden soñar sino con el de formar dos bacterias, dos amebas, varios helechos? Si hoy en día hay seres vivos sobre la Tierra es sólo porque otros seres vivos han estado reproduciéndose obstinadamente desde hace más de dos mil millones de años. Imaginemos un mundo todavía sin habitantes. Es posible concebir que puedan organizarse en él sistemas que posean ciertas propiedades de la materia viva, como el poder de reaccionar ante ciertos estímulos, de

[1] *Leçons sur les phénomènes de la vie,* I, 1878, págs. 50-51.

asimilar, de respirar, incluso de crecer, pero no de reproducirse. ¿Se pueden calificar de vivos tales sistemas? Cada uno de ellos representa el fruto de una larga y penosa elaboración. Cada nacimiento constituye un acontecimiento único, sin porvenir. Cada vez es un volver a empezar. Siempre a merced de cualquier cataclismo local, tales organizaciones sólo pueden tener una existencia efímera. Además, su estructura se encuentra rígidamente fijada de entrada, sin posibilidad de cambio. Por el contrario, si surge un sistema capaz de reproducirse, aunque lo haga lentamente y a un alto precio, sin duda alguna podemos considerarlo vivo. Se diseminará hasta donde lo permitan las condiciones. Cuanto más se propague más a cubierto de cualquier catástrofe se encontrará. Terminado el largo periodo de incubación, esta organización se perpetúa mediante la repetición de eventos idénticos. El primer paso está dado. Pero, para un sistema semejante, la reproducción que constituye la causa misma de su existencia se convierte también en su fin. Está condenado a reproducirse o desaparecer. Conocemos formas de vida que se han sucedido inmutables durante un enorme número de generaciones. Conocemos plantas anuales en las que nada ha cambiado desde hace millones de años, es decir, a través de por lo menos otros tantos ciclos sucesivos. El límulo de las playas tropicales de hoy es idéntico al que muestran los fósiles de la era secundaria, lo que quiere decir que el programa no ha variado durante todo este tiempo, que cada generación ha cumplido con precisión su papel, consistente en reproducir fielmente el programa para la generación siguiente.

Ahora bien, si al sistema le ocurre algo que por casualidad «mejora» el programa y facilita, de un modo u otro, la reproducción de ciertos descendientes, entonces éstos heredan de forma natural el poder de multiplicarse mejor. La finalidad del programa transforma así algunos de sus cambios en factores adaptativos, ya que la variabilidad es una cualidad inherente a la naturaleza misma de lo viviente, a la estructura del programa, al modo en que cada generación vuelve a copiarlo. Las modificaciones del programa se producen a ciegas. Sólo posteriormente interviene una selección por el hecho mismo de que todo organismo que surge es sometido inmediatamente a la prueba de la reproducción. La famosa «lucha por la vida» no representa, a fin de cuentas, más que unas oposiciones para ganar la descendencia. Oposiciones interminables, porque

vuelven a convocarse en cada generación. En esta eterna competición no hay más criterio que la fecundidad. Automáticamente vencen los más prolíficos en sutil combate entre las poblaciones y su medio. A fuerza de tirar siempre hacia los que tienen más descendientes, la reproducción termina por hacer que las poblaciones deriven por vías muy precisas. La selección natural no expresa más que las restricciones que impone el entorno sobre la multiplicación de los organismos. Si el mundo viviente evoluciona en sentido contrario al mundo inanimado, si se dirige no hacia el desorden, sino hacia un orden creciente, es gracias a la exigencia impuesta sobre los seres vivos de reproducirse cada vez más y cada vez mejor. Por la necesidad de la reproducción, aquello que inevitablemente hubiera conducido a un sistema inerte hacia la disgregación se convierte para lo vivo en fuente de novedad y diversidad.

La noción de programa permite establecer una distinción neta entre los dos órdenes que la biología trata de instaurar en el mundo de lo viviente. En contra de lo que imagina mucha gente, la biología no es una ciencia unificada. La heterogeneidad de los objetos, la divergencia de los intereses, la variedad de las técnicas, todo ello contribuye a multiplicar las disciplinas. En los extremos del abanico se distinguen dos grandes tendencias, dos actitudes que acaban siendo radicalmente opuestas. La primera de estas actitudes puede calificarse de integrista o evolucionista.

Para ella el organismo no sólo no es disociable en sus constituyentes, sino que con frecuencia se le considera un elemento de un sistema de orden superior: grupo, especie, población, familia ecológica. Esta biología se interesa por las colectividades, por los comportamientos, por las relaciones que los organismos mantienen entre sí o con su medio ambiente. Busca en los fósiles la huella de la aparición de las formas actuales. Impresionada por la increíble variedad de los seres, analiza la estructura del mundo viviente, busca las causas de los rasgos presentes, describe los mecanismos de la adaptación. Su objetivo es precisar las fuerzas y los caminos que han conducido a los sistemas vivos hasta la fauna y flora de hoy. Para el biólogo integrista el órgano y la función no tienen interés más que en el seno de un todo constituido no sólo por el organismo, sino por la especie y su cortejo de sexualidad, de presas, de enemigos, de comunicación, de ritos. El biólogo integrista se niega a admitir que *todas* las propiedades de un ser vivo, su comportamiento, sus logros, puedan

explicarse sólo por sus estructuras moleculares. Para él la biología no puede reducirse a la física y la química. No se trata de invocar lo incognoscible de una fuerza vital, sino de considerar que, a cualquier nivel, la integración otorga a los sistemas propiedades que no tienen sus elementos. El todo es más que la suma de sus partes.

En el otro polo de la biología tenemos la actitud opuesta, que podemos denominar tomista o reduccionista. Para ella el organismo es un todo, desde luego, pero que debe explicarse sólo por las propiedades de sus partes. Se interesa por el órgano, por los tejidos, por la célula, por las moléculas. La biología tomista busca la explicación de las funciones únicamente a través de las estructuras. Sensible a la unidad de composición y funcionamiento que observa tras la diversidad de los seres vivos, en los logros del organismo ve la expresión de sus reacciones químicas. Para el biólogo tomista se trata de aislar los constituyentes de un ser vivo y de encontrar las condiciones que le permitan estudiarlos en un tubo de ensayo. Variando estas condiciones, repitiendo los experimentos, precisando cada parámetro, este biólogo trata de dominar el sistema y de eliminar sus variables. Su esperanza consiste en descomponer la realidad hasta donde sea posible para analizar los elementos con el ideal de pureza y certidumbre representado por las experiencias de la física y la química. Para él no existe carácter alguno del organismo que, en última instancia, no pueda describirse en términos de moléculas y de sus interacciones. No se trata de negar los fenómenos de integración y generación de las formas. Sin duda alguna el todo puede tener propiedades de las que están desprovistos sus constituyentes. Pero estas propiedades resultan de la estructura misma de esos constituyentes y de su ordenación.

Entre ambas actitudes no hay sólo una diferencia de método y de objetivo, sino también de lenguaje, de esquemas conceptuales y, por eso mismo, de explicaciones causales que dan cuenta del mundo vivo. Una se ocupa de las causas remotas que intervienen en la historia de la Tierra y de los seres vivos a lo largo de millones de generaciones. La otra, por el contrario, de las causas inmediatas que ponen en juego los constituyentes del organismo, su funcionamiento, las reacciones frente al entorno. No pocas controversias y malentendidos, en particular sobre la finalidad de los seres vivos, se deben a una confusión entre estas dos actitudes. Cada una de ellas aspira a instaurar un orden en el mundo viviente. Para una se

trata del orden a través del cual se enlazan los seres, se establecen las filiaciones, se diseñan las especializaciones. Para la otra se trata del orden estructural a través del cual se determinan las funciones, se coordinan las actividades, se integra el organismo. La primera considera los seres vivos como elementos de un vasto sistema que engloba toda la Tierra. La segunda se interesa por el sistema constituido por cada ser vivo. Una busca establecer un orden entre los organismos; la otra lo busca dentro del organismo. Los dos órdenes vienen a articularse en el nivel de la herencia, que constituye, por así decirlo, el orden del orden biológico. Si las especies son estables es porque el programa ha vuelto a copiarse escrupulosamente, signo a signo, de una generación a otra. Si varían es porque de vez en cuando el programa se modifica. Se trata, por lo tanto, de analizar la estructura de los programas, su lógica, su ejecución, pero también de buscar su historia, sus desviaciones, las leyes que rigen sus cambios a través de las generaciones en función de los sistemas ecológicos. En cualquier caso, sin embargo, es la meta de la reproducción la que justifica tanto la estructura de los sistemas vivos como su historia. El menor de los organismos, la menor de las células, la menor de las moléculas de proteína, son producto de una experimentación que prosigue sin descanso desde hace más de dos mil millones de años. ¿Qué significado podría tener un mecanismo regulador de la producción celular de un metabolito por una célula si no es la economía energética y de síntesis? ¿O qué significado puede tener el efecto de una hormona sobre el comportamiento de un pez si no es inducirle a proteger su descendencia? Es por fines precisos por lo que una molécula de hemoglobina cambia de conformación según la tensión de oxígeno, por lo que una célula suprarrenal produce cortisona, por lo que el ojo de la rana detecta las formas que se mueven delante de él, por lo que el ratón huye delante del gato, por lo que un pájaro macho se pavonea delante de la hembra. En todos los casos, se trata de una propiedad que confiere al organismo una ventaja en la competencia por dejar más descendencia. Ajustar una respuesta al medio, a un enemigo en potencia, a un posible compañero sexual, es justamente adaptarse. En la selección natural, un programa genético que determina el automatismo de tales reacciones tiene la garantía de imponerse al que no lo hace, lo mismo que un programa que permita el aprendizaje y la adaptación del comportamiento a través de diversos sistemas

de regulación. En todos los casos es la reproducción la que funciona como principal operador del mundo viviente. Por una parte, es el propósito de todo organismo. Por otra, orienta la historia sin propósito de los organismos. Hace ya mucho tiempo que el biólogo se encuentra frente a la teleología como ante una mujer de la que no puede prescindir, pero en cuya compañía no quiere ser visto en público. El concepto de programa otorga ahora estatuto legal a esta relación oculta.

La biología moderna ambiciona interpretar las propiedades del organismo a través de la estructura de las moléculas que lo constituyen. En este sentido se corresponde con una nueva era de la técnica. El programa representa un modelo tomado de los ordenadores electrónicos. Compara el material genético de un huevo con la banda magnética de un ordenador. Evoca una serie de operaciones que deben efectuarse, la rigidez de su sucesión en el tiempo, el diseño subyacente. De hecho, ambas clases de programas difieren en muchos aspectos. En primer lugar por sus propiedades: uno es modificable a voluntad y el otro no; en un programa magnético se añade o se borra información en función de los resultados obtenidos, mientras que la estructura nucleica no es accesible por la experiencia adquirida y permanece invariante a través de las generaciones. Ambos programas difieren también por su papel y por las relaciones que mantienen con los órganos ejecutivos. Las instrucciones del programa de la máquina no se refieren a su propia estructura física ni a las piezas que la componen. Las del programa del organismo, por el contrario, determinan la constitución de sus propios elementos, es decir, de los órganos encargados de ejecutar el programa. Aunque pudiera construirse una máquina capaz de reproducirse, ésta se limitaría a fabricar copias de sí misma en el estado que tuviese en el momento de producirlas. A la larga toda máquina se desgasta. Poco a poco las hijas se irían haciendo necesariamente menos perfectas que las madres. En pocas generaciones el sistema derivaría cada vez un poco más hacia el desorden estadístico. La descendencia estaría condenada a la muerte. Por el contrario, reproducir un ser vivo no consiste en volver a copiar al progenitor tal como es en el momento de la procreación. Es crear un nuevo ser. Es poner en marcha, a partir de un estado inicial, una serie de acontecimientos que lo conducen al estado de los progenitores. Cada generación no parte de cero, sino del mínimo vital, es decir, la célula. En el programa están contenidas todas

las operaciones que describen el ciclo entero, que conducen a cada individuo desde su juventud hasta su muerte. Pero esto no quiere decir que todo esté fijado con rigidez en el programa genético. Con frecuencia éste no hace otra cosa que establecer unos límites a la acción del medio, o incluso dar al organismo la capacidad de reaccionar, el poder de adquirir un suplemento de información no innata. Fenómenos tales como la regeneración o las modificaciones inducidas en el individuo por el medio muestran claramente que en la expresión del programa existe cierta flexibilidad. A medida que los organismos se complican y su sistema nervioso crece en importancia, las instrucciones genéticas les confieren nuevas potencialidades, como la capacidad de recordar o aprender. Sin embargo, el programa interviene también en estos fenómenos. En el caso del aprendizaje, el programa determina qué puede aprenderse y cuándo debe tener lugar el aprendizaje en el curso de la vida; en el caso de la memoria, limita la naturaleza de los recuerdos, su número y su duración. Así pues, la rigidez del programa varía según las operaciones. Ciertas instrucciones se ejecutan al pie de la letra. Otras se traducen en capacidades o potencialidades. Pero, en resumidas cuentas, es el programa el que fija su grado de flexibilidad y la gama de variaciones posibles.

El tema que tratamos aquí es el conocimiento de la herencia y la reproducción, las transformaciones que han modificado progresivamente la manera de considerar la naturaleza de los seres vivos, su estructura, su permanencia a lo largo de las generaciones. Para un biólogo hay dos maneras de enfocar la historia de su ciencia. Una es considerar la sucesión de las ideas y su genealogía. Es cuestión de seguir el hilo que ha guiado al pensamiento hasta las teorías hoy vigentes. Esta historia se hace, por así decirlo, a contracorriente, extrapolando el presente al pasado. Se busca el antecedente de la hipótesis en curso, después el antecedente del antecedente, y así sucesivamente. En esta manera de obrar, las ideas adquieren independencia. Se comportan un poco como seres vivos. Nacen, engendran, mueren. Al tener valor explicativo tienen también poder de contagio y de invasión. El resultado es una especie de evolución de las ideas, sometida ora a una selección natural fundada sobre un criterio de interpretación teórica (por tanto de reutilización práctica) ora a la sola teleología de la razón. Según esta manera de ver, la generación espontánea, por ejemplo, comienza a debilitarse tras las experiencias de

Francisco Redi, sigue perdiendo terreno tras las de Spallanzani, y desaparece definitivamente tras las de Pasteur. Pero entonces no se comprende por qué es necesario esperar a que Pasteur repita, aunque sea en forma mejorada, los experimentos de Spallanzani para llegar a las mismas conclusiones. Ni por qué Needham hace exactamente lo mismo que Spallanzani, obtiene resultados inversos y llega a conclusiones opuestas. Lo mismo pasa con la teoría de la evolución. Se puede ver en Lamarck al precursor de Darwin, en Buffon al de Lamarck, en Benoit de Maillet al de Buffon, y así sucesivamente. Pero tenemos que preguntarnos por qué a principios del siglo XIX los mismos que (como Goethe, Erasmus Darwin o Geoffroy Saint-Hilaire) están a la búsqueda de argumentos en favor del transformismo ignoran casi totalmente las ideas de Lamarck. Hay otra manera de concebir la historia de la biología, la que consiste en investigar cómo los objetos se han hecho accesibles al análisis, permitiendo así que nuevas disciplinas se conviertan en ciencias. Se trata entonces de precisar la naturaleza de tales objetos, la actitud de quienes los estudian, su manera de observar, los obstáculos que levanta frente a ellos su medio cultural. La importancia de un concepto se mide por su valor operativo, por el papel que desempeña al orientar la observación y la experiencia. Ya no existe una filiación más o menos lineal de ideas que se engendran sucesivamente. Existe un terreno que el pensamiento se empeña en explorar, en el que busca instaurar un orden y trata de constituir un mundo de relaciones abstractas concordantes no sólo con las observaciones y las técnicas, sino también con las prácticas, los valores y las interpretaciones vigentes. Las ideas antaño rechazadas adquieren con frecuencia tanta importancia como aquéllas con las que la ciencia de hoy intenta identificarse, y lo mismo sucede con las dificultades y las nuevas perspectivas. El conocimiento opera aquí en dos niveles. Cada época se caracteriza por el campo de posibilidades definido no sólo por las teorías o creencias vigentes, sino también por la naturaleza misma de los objetos accesibles al análisis, los medios para estudiarlos y la manera de observarlos o de hablar de ellos. La lógica sólo puede actuar dentro de este ámbito. Las ideas se mueven dentro de los límites así establecidos, es ahí donde se contrastan y se oponen. Se trata entonces de elegir entre todos los enunciados posibles el que mejor integra los resultados del análisis. Ahí es donde interviene el individuo. Pero en esta interminable discusión

entre lo que es y lo que puede ser, en la búsqueda de una fisura por la que se revele otra forma de lo posible, el margen de maniobra que le queda al individuo es a veces muy limitado; y la importancia de este último disminuye conforme aumenta el número de practicantes de la ciencia. Con frecuencia, si una observación no se hace aquí hoy se hará en otro lugar mañana. Durante mucho tiempo nos preguntaremos qué le hubiese sucedido al pensamiento científico si Newton hubiese sido recolector de manzanas, Darwin capitán de barcos de altura y Einstein el fontanero que él mismo lamentaba no haber sido nunca. En el peor de los casos, la gravitación y la relatividad habrían sufrido algunos años de retraso. En lo que respecta a la teoría de la evolución ni siquiera hubiera pasado esto, ya que Wallace la enunció al mismo tiempo que Darwin. Cuando una concepción se manifiesta demasiado pronto, como en el caso de Mendel, nadie le presta atención. Cuando se hace viable para el reducido círculo de los especialistas, entonces aparece en varios sitios a la vez. Sin embargo, una vez aceptadas, las teorías de la ciencia contribuyen más que cualesquiera otras a reorganizar el campo de lo posible, a modificar la manera de considerar las cosas, a poner de relieve relaciones o nuevos objetos; en definitiva, a alterar el orden vigente.

Esta manera de considerar la evolución de una ciencia como la biología difiere profundamente de la precedente. No se trata ya de encontrar el camino real de las ideas, de reencontrar el camino seguro de un progreso hacia lo que aparece hoy como la solución, de utilizar los valores racionales hoy vigentes para interpretar el pasado y buscar en él la prefiguración del presente. Por el contrario, se trata de determinar las etapas del saber, de precisar sus transformaciones, de descubrir las condiciones que permiten a los objetos y las interpretaciones entrar en el terreno de lo posible. La eliminación de la generación espontánea ya no es una operación casi lineal que conduce de Redi a Pasteur, pasando por Spallanzani. Darwin ya no es simplemente el hijo de Lamarck y el nieto de Buffon. La desaparición de la generación espontánea y la aparición de una teoría de la evolución se presentan, en conjunto, como productos de mediados del siglo XIX que hacen intervenir el concepto de vida y el de historia en el conocimiento de los seres.

Dichas teorías sólo podían surgir tras delimitarse la especie, establecerse una línea de demarcación entre lo orgánico y lo inorgánico y elimi-

narse la serie de transiciones que conducía progresivamente de los organismos más sencillos a los más complejos. En resumidas cuentas, Linneo y Cuvier, cuyo dogmatismo y rigidez les hizo aferrarse obstinadamente a la idea de la fijeza de las especies, contribuyeron a la eliminación de la creencia en la generación espontánea al menos tanto como Redi y Spallanzani con sus experiencias. Al romper el viejo mito de la cadena de los seres vivos, puede que Cuvier haya hecho más por la teoría de la evolución que Lamarck al generalizar el transformismo del siglo XVIII.

En biología hay muchas generalizaciones y pocas teorías. Entre éstas, la teoría de la evolución ocupa un lugar privilegiado con respecto a las demás porque reúne gran cantidad de observaciones dentro de los dominios más diversos, observaciones que sin ella estarían desconectadas, porque interrelaciona todas las disciplinas que se ocupan de los seres vivos, y porque instaura un orden dentro de la extraordinaria variedad de los organismos y los une estrechamente con el resto de la Tierra; en resumen, porque brinda una explicación causal del mundo viviente y de su heterogeneidad. La teoría de la evolución se resume esencialmente en dos proposiciones. En primer lugar, señala que los organismos del pasado, el presente o el futuro descienden de uno o unos pocos sistemas vivos surgidos espontáneamente; en segundo lugar, señala que las especies proceden unas de otras por selección natural de los mejores reproductores. La teoría de la evolución presenta uno de los inconvenientes más graves para una teoría científica, ya que, al basarse en la historia, no se presta a ningún tipo de comprobación directa. Si, pese a ello, conserva un carácter científico frente a lo mágico y lo religioso es porque está sometida a la comprobación que puede aportarle la experiencia. Su formulación supone el riesgo de que algún día sea desmentida por la observación. Pero, hasta hoy, la mayoría de las generalizaciones establecidas por la biología no hacen sino reflejar ciertos aspectos de la teoría de la evolución y confirmarla. Éste es el caso de proposiciones tales como: todos los seres vivos están constituidos por células; todos los seres vivos utilizan los mismos isómeros ópticos; la información genética de un organismo está contenida en el ácido desoxirribonucleico; un ser vivo obtiene la energía que necesita a partir de reacciones de fosforilación acopladas a la absorción de luz o la descomposición de un compuesto químico.

Lo que la fisiología y la bioquímica han demostrado a lo largo del presente siglo es, en primer lugar, la unidad de composición y de funcionamiento del mundo vivo. Al margen de la variedad de formas y la diversidad de logros, todos los organismos utilizan los mismos materiales para efectuar reacciones similares. Es como si, en su conjunto, el mundo vivo utilizase siempre los mismos ingredientes y las mismas recetas, y que la fantasía interviniese únicamente en la cocción y los condimentos. Se debe admitir, pues, que una vez hallada la receta que se reveló como la mejor, la naturaleza la ha seguido en el transcurso de la evolución. Sea cual sea su especialidad, tanto si se ocupa de organismos como de células o de moléculas, no existe hoy un solo biólogo que tarde o temprano no se refiera a la evolución para interpretar los resultados de su análisis. En cuanto a las otras teorías elaboradas por la biología, como la de la conducción nerviosa o la de la herencia, por lo general son de una gran simplicidad, con un grado de abstracción muy bajo; y cuando aparece una entidad abstracta, como el gen, el biólogo no se detiene hasta sustituirla por elementos materiales, partículas o moléculas. Es como si, para persistir en biología, una teoría tuviese que referirse a un modelo concreto.

Quizá lo que ha transformado más profundamente el estudio de los seres vivos es el acceso al análisis de objetos nuevos; y no siempre como consecuencia de la aparición de una nueva técnica que aumenta el equipamiento sensorial, sino más bien de un cambio en la manera de contemplar el organismo, de interrogarlo, de formular las preguntas a las que la observación debe dar respuesta. En efecto, con frecuencia es la adopción de un nuevo enfoque lo que hace desaparecer un obstáculo, surgir de la oscuridad aspectos ocultos de un objeto o una relación hasta entonces insospechada. No es un instrumento inédito el que de repente permitió, a finales del siglo XVIII, comparar la pata del caballo con la pierna del hombre y encontrar analogías en su estructura y función. De la obra de Fernel, que introduce el término fisiología, a la de Harvey, que hace asequible a la experimentación la circulación de la sangre, el escalpelo no ha cambiado ni de forma ni de propiedades. Entre Mendel y el resto de los que se interesan por la herencia a lo largo del siglo XIX sólo existen ligeras diferencias en cuanto a la elección de los objetos experimentales, en lo que se observa y, sobre todo, en lo que se desdeña; y si la obra de Mendel permanece ignorada durante más de treinta años es porque ni

los biólogos de profesión ni los ganaderos ni los horticultores están todavía en condiciones de asumirla. «Quienes buscan a Dios lo encuentran», decía Pascal. Pero sólo se encuentra al Dios que se busca.

Aun cuando un instrumento aumenta de repente el poder de resolución de los sentidos, no representa más que la aplicación práctica de una concepción abstracta. El microscopio es la reutilización de las teorías físicas sobre la luz. Y no basta con «ver» un cuerpo hasta entonces invisible para transformarlo en objeto de análisis. Cuando Leeuwenhoek contempla por primera vez una gota de agua a través del microscopio, descubre un mundo desconocido: formas que se agitan, seres que viven, toda una fauna imprevisible que de repente el instrumento hace asequible a la observación. Pero el pensamiento de la época no sabe qué hacer con todo este mundo. Es incapaz de atribuir una función a esos seres microscópicos y de relacionarlos con el resto del mundo vivo. Este descubrimiento sirve únicamente como tema de conversación. El que seres tan pequeños, invisibles a simple vista, puedan vivir, nadar, moverse, es motivo de maravilla y demuestra, si es que era necesario, el poder y la generosidad de la naturaleza. Tema de distracción también para círculos y salones dedicados a la ciencia recreativa. Y tema de escándalo para aquellos que, como Buffon, ven en estos seres microscópicos una especie de ultraje a todo el mundo viviente. Que una gota de agua pueda contener millares de cuerpos vivientes es un insulto a todos los seres, y en particular al más noble de entre ellos. En esa misma coyuntura, Robert Hooke observa un fragmento de corcho al microscopio y descubre una especie de alvéolos a los que llama células. Malpighi y otros encuentran formas parecidas en los cortes de ciertos parénquimas vegetales. Pero no están en condiciones de extraer la menor conclusión sobre la constitución de las plantas. A finales del siglo XVII se trata de analizar la estructura visible de los seres vivos y no de descomponerla en subunidades. El único terreno en el que el pensamiento está preparado para aceptar las revelaciones del microscopio lo constituye la generación. Desde siempre, los hechos que acompañan la combinación de simientes y el desarrollo del huevo quedaban ocultos por falta de equipamiento sensorial suficiente. De este modo, cuando Leeuwenhoek y Hartsoeker distinguen en el líquido espermático de los más variados animales machos unos «animálculos» que nadan febrilmente, les encuentran inmediatamente una

función; y no la buena precisamente, porque durante mucho tiempo se trata de convertir a estos «animálculos» en los únicos artífices de la generación o limitar su papel al de comparsas. Para que un objeto sea asequible al análisis no basta con advertir su existencia. Es necesario además que una teoría esté preparada para acogerlo. En la relación entre teoría y experiencia, siempre es la primera la que inicia el diálogo. Es la teoría la que determina la forma de la pregunta, es decir, los límites de la respuesta. «El azar sólo favorece a las mentes preparadas», decía Pasteur. En este caso, el azar supone que la observación ha sido hecha accidentalmente y no con el fin de comprobar la teoría. Pero la teoría que permite interpretar el accidente ya existía.

La biología, como las restantes ciencias de la naturaleza, ha perdido hoy muchas de sus ilusiones. No busca ya la verdad. Construye la suya. La realidad surge entonces como un equilibrio siempre inestable. En el estudio de los seres vivos, la historia pone de manifiesto una sucesión de oscilaciones, un movimiento pendular entre lo continuo y lo discontinuo, entre la estructura y la función, entre la identidad de los fenómenos y la diversidad de los seres. De este vaivén es de donde surge, poco a poco, la arquitectura de lo vivo, que aparece en estratos cada vez más profundos. Tanto en el mundo viviente como fuera de él, se trata siempre de «explicar lo visible complejo mediante lo invisible simple», como dijo Jean Perrin. Pero, tanto en los seres como en las cosas, se trata de un invisible compartimentado. No existe una organización de lo vivo, sino una serie de organizaciones encajadas unas dentro de otras, como las muñecas rusas. Detrás de cada una de ellas se oculta otra. Más allá de cada estructura asequible al análisis termina por surgir una nueva estructura de orden superior, que integra la primera y le confiere sus propiedades. Solo se llega a ésta modificando aquélla, descomponiendo el espacio del organismo para recomponerlo según otras leyes. A cada nivel de organización, puesto en evidencia de este modo, responde una nueva manera de concebir la formación de los seres vivos. Desde el siglo XVII vemos aparecer así en cuatro ocasiones una nueva organización, una estructura de orden superior: primero, a principios del siglo XVII, la disposición de las superficies visibles, lo que puede llamarse estructura de orden uno; después, a finales del siglo XVIII, la «organización», la estructura de orden dos que engloba órganos y funciones y termina por resolverse en

células; a continuación, a comienzos del siglo XX, los cromosomas y los genes, la estructura de orden tres oculta en el corazón de la célula; finalmente, a mediados de este siglo, la molécula de ácido nucleico, la estructura de orden cuatro sobre la que hoy descansa la conformación de todo organismo, sus propiedades, su permanencia a través de las generaciones. El análisis de los seres vivos viene a converger sucesivamente sobre cada una de estas organizaciones.

Lo que se ha querido describir aquí son las condiciones que desde el siglo XVI han permitido la aparición sucesiva de estas estructuras. Es la forma en que la generación, creación renovada que necesita siempre de la intervención de alguna fuerza externa, se ha transformado en reproducción, propiedad interna de todo sistema vivo. Es el acceso a estos objetos, cada vez más ocultos, que constituyen las células, los genes, las moléculas de ácido nucleico. El descubrimiento de cada muñeca rusa, la revelación de estos desniveles sucesivos, no resulta simplemente de una acumulación de observaciones y experiencias. Con frecuencia expresan un cambio más profundo, una transformación en la naturaleza misma del saber. No hacen sino traducir, en el estudio del mundo viviente, una manera nueva de considerar los objetos.

# 1. La estructura visible

En el volumen titulado *Monstres et prodiges*, que completa su tratado sobre la generación publicado en 1573, Ambroise Paré constata: «La naturaleza trata siempre de hacer un ser semejante: se ha visto un cordero con cabeza de cerdo, porque un verraco había cubierto a una oveja»[2]. Lo que sorprende hoy de esta frase no es la presencia de un monstruo que reúne caracteres de especies distintas —cualquiera puede imaginarlo o dibujarlo— ni tampoco la forma en que ha sido generado: una vez admitida la posibilidad de semejante intercambio de formas y órganos, la copulación sigue pareciendo el medio más sencillo para obtener un híbrido así. Lo más desconcertante es la argumentación contenida en la frase. Para demostrar lo que hoy se presenta como uno de los fenómenos más regulares de la naturaleza, la formación del hijo a imagen de los padres, Ambroise Paré invoca la visión de algo cuya existencia consideramos imposible, de algo que la regularidad misma del fenómeno parece excluir. Desgraciadamente, Paré nunca dice a qué se asemejan los descendientes del cordero con cabeza de cerdo. En ninguna parte nos dice si ha engendrado otros corderos con cabeza de cerdo.

En la época de Paré aún no existen leyes de la naturaleza, ni para la generación de los animales ni para el movimiento de los astros. No se distingue entre la necesidad de los fenómenos y la contingencia de los sucesos. Si el caballo nace del caballo y el gato del gato, ello no se debe a un mecanismo que permita a los seres vivos producir copias de sí mismos, al estilo de la imprenta que produce copias de un texto. El concepto de reproducción no se aplica a la formación de los cuerpos vivientes hasta finales del siglo XVIII. Anteriormente los seres no se reproducían: eran engendrados. La generación es siempre el resultado de una creación que, en una etapa u otra, exige la intervención directa de las fuerzas divinas. Para explicar el mantenimiento de las estructuras visibles por filiación, el siglo XVIII atribuirá la formación de todos los individuos pertenecientes a una misma especie a una serie de creaciones simultáneas,

[2] *Oeuvres*, París, tomo III, F. 20, 1841, pág. 43.

realizadas sobre un mismo modelo en la génesis del mundo. Una vez creados, los futuros seres pueden ya esperar la hora de su nacimiento al abrigo de cualquier fantasía e irregularidad. Pero hasta el siglo XVII la formación de un ser está sometida directamente a la voluntad del Creador. No tiene raíces en el pasado. La generación de cada planta, de cada animal, constituye en cierta medida un acontecimiento único, aislado, independiente de cualquier otra creación, algo así como la producción de un objeto o de una obra de arte por el hombre.

## La generación

El conocimiento del mundo vivo apenas cambió de la Antigüedad al Renacimiento. Cuando Cardano, Fernel o Aldrovando hablan de los seres, repiten más o menos lo que ya decían Aristóteles, Hipócrates o Galeno. En el siglo XVI, cada cuerpo de este mundo, cada planta, cada animal, se describen siempre como una combinación particular de materia y forma. La materia se compone siempre de los mismos cuatro elementos. Así pues, sólo la forma caracteriza un cuerpo. Para Fernel, cuando se crea algo es la forma lo que comienza[3]. Cuando este algo muere, sólo desaparece la forma, pero no la materia, ya que si la materia misma desapareciese, entonces el mundo habría desaparecido hace ya mucho tiempo; se habría desgastado. Lo que sitúa la forma en la materia, para crear astros, piedras o seres, es la Naturaleza. Pero ésta no es más que un agente ejecutivo, un principio que actúa bajo el dictado de Dios. Cuando vemos una iglesia o una estatua sabemos perfectamente que en algún lugar existe o ha existido un arquitecto o escultor que las ha creado. Igualmente, un río, un árbol o un ave deben haber sido creados por un Poder Supremo, una Inteligencia que, tras decidir hacer un mundo, lo ordena, lo mantiene y lo dirige constantemente.

Lo semejante que invoca Ambroise Paré para explicar la formación del cordero con cabeza de cerdo no tiene el mismo estatuto que en la actualidad. Para conocer las cosas es necesario distinguir los signos externos visibles dispuestos por la naturaleza a fin de permitir al hombre comprender sus relaciones. Es preciso descubrir el sistema de semejan-

---

[3] *De abditis rerum causis, I, I:* Opera, Ginebra, 1637, págs. 483-484.

zas, la red de analogías y similitudes que permite acceder a ciertos secretos de la naturaleza. «De la similitud de las cosas», indica Porta, «pueden deducirse las intenciones divinas»[4]. Para conocer un objeto no hay que descuidar ninguna de las analogías que lo relacionan con las cosas y los seres. Así, tenemos plantas que semejan cabellos, ojos, saltamontes, gallinas, ranas, serpientes. Los animales se reflejan en las estrellas, en las plantas, en las piedras, donde, según Pierre Belon, «la naturaleza se ha dedicado más a expresar la forma de los peces que la de los otros animales»[5]. Las semejanzas particularmente difíciles de observar llevan una marca: están firmadas. Las firmas ayudan a descubrir analogías que de otro modo podrían pasar desapercibidas. Gracias a las similitudes y las firmas es posible pasar del mundo de las formas al de las fuerzas. Con las analogías, «lo invisible se hace visible», dice Paracelso[6]. Pues las semejanzas no son ni inútiles ni gratuitas. No traducen una simple diversión celestial. Las semejanzas obedecen a la posesión de propiedades comunes. Inversamente, la similitud traduce una comunión de cualidad. El parecido de una planta con los ojos es señal de que dicha planta debe utilizarse para tratar las enfermedades oculares. Detrás de las similitudes se oculta la naturaleza de las cosas; y el parecido del niño con sus padres no es más que un aspecto particular de las conexiones secretas entre los seres y las cosas.

El orden que se establece en un ser vivo no se distingue, pues, del que reina en el universo. Todo es naturaleza y la naturaleza es una, como atestigua esta página de Paracelso consagrada a los médicos: «El médico debe saber lo que es útil y nocivo para las criaturas insensibles, los monstruos marinos y los peces, lo que aman y lo que detestan los animales privados de razón, lo que les es bueno y perjudicial. Esto es lo que constituye su cultura en relación a la naturaleza. Aún hay más. Los poderes de las fórmulas mágicas, su origen y su procedencia, su naturaleza: quién es Melusina, quién es Sirena, qué es la permutación, el trasplante y la transmutación, cómo aprehenderlos y como comprenderlos perfectamen-

[4] *Phytognomonica, I, 8,* Ruán, 1650, pág. 14.

[5] *La nature et diversité des poissons*, París, 1555, pág. 87.

[6] *Les cinq livres de Auréole Philippe Théophraste de Hohenheim, prol.;* trad. francesa, en Oeuvres médicales, París, 1968, pág. 194.

te, lo que supera la naturaleza, la especie, la vida, la naturaleza de lo invisible, de lo dulce y de lo amargo, lo que tiene buen sabor, lo que representa la muerte, lo que utiliza el pescador, el curtidor, el tintorero, el forjador, el artesano de la madera, lo que hay en la cocina, en la bodega, en el jardín, lo que concierne al tiempo, la ciencia del cazador y del minero, la condición del vagabundo y del sedentario, las necesidades de los campos y las causas de la paz, la razón del laico y del eclesiástico, los quehaceres y la naturaleza de los diferentes estados, su origen, la naturaleza de Dios y de Satán, el veneno y el antídoto, la naturaleza femenina y la naturaleza masculina, la diferencia entre las mujeres y las vírgenes, entre lo que es amarillo y lo que es gris oscuro, lo que es blanco, negro, rojo y pálido, las causas de la multiplicidad de colores, de la brevedad y de la longitud, del éxito, del fracaso y de cómo obtener estos resultados»[7].

Un ser vivo, por consiguiente, no puede reducirse a su única estructura visible. Es un eslabón de la cadena secreta que une todos los objetos de este mundo. Cada animal y cada planta se convierten en una especie de cuerpo proteiforme que se prolonga no solamente en los otros seres, sino también en las piedras, en las estrellas e incluso en las actividades humanas. No se le observa únicamente en la realidad, sino en la cocina, en el cielo, en los escudos, en casa del boticario, del curtidor, del pescador, del cazador. Cuando Aldrovando habla del caballo, describe su forma y aspecto en cuatro páginas. Pero necesita cerca de trescientas para entrar en detalles sobre los nombres del caballo, su cría, hábitat, temperamento, docilidad, memoria, estado afectivo, reconocimiento, fidelidad, generosidad, espíritu de victoria, rapidez, agilidad, capacidad prolífica, simpatías, antipatías, enfermedades y tratamiento; tras esto vienen los caballos monstruosos, los caballos prodigiosos, los caballos fabulosos, los caballos célebres, con descripción de los lugares donde se hicieron famosos, el papel de los caballos en la equitación, en el transporte, en la guerra, en la caza, en los juegos, en las faenas del campo, en los desfiles, la importancia del caballo en la historia, en la mitología, en la literatura, en los proverbios, en la pintura, en la escultura, en las medallas, en los blasones.

---

[7] *Le livre Paragranum,* ibid., págs. 95-96.

El mundo vivo no puede así ordenarse según el criterio único de las formas. La disposición de los seres se opera a un nivel distinto, conforme a otra delimitación del saber. Todo se presenta en la naturaleza como continuo y, más que categorías, lo que en ella se encuentra es una jerarquía. Subsiste la vieja ordenación de Aristóteles, la diferencia evidente que distingue los seres vivos de los minerales, y de la que sólo el alma puede dar cuenta. Dentro de los seres vivos, puede diferenciarse entre plantas, animales y seres humanos, cuyas diversas cualidades se corresponden con los diversos tipos de almas que Dios les otorga. En la jerarquía de los seres, sin embargo, la progresión se realiza mediante pequeñísimas gradaciones. Entre estas formas que se interpenetran es harto difícil determinar dónde empieza y dónde acaba cada grupo.

¿Quién dirá si una esponja es una planta o un animal, o si un coral es en realidad una piedra? «Así como los zoófitos recuerdan a la vez al animal y la planta», afirma Cesalpino, «los hongos pertenecen al mismo tiempo a los vegetales y las cosas inanimadas»[8]. De hecho, la única frontera que el siglo XVI no duda en trazar en el mundo viviente es entre el hombre y los «brutos». En lo que respecta a la distinción entre el vegetal y el animal, sólo puede hacerse por medio de una zona de contacto en la que la evidencia de las diferencias se desvanece ante la importancia de las analogías. «Todas las partes de las plantas», señala Cardano, «se corresponden con las partes de los animales, las raíces se asemejan a la boca, y las partes bajas del tronco al vientre, las hojas a los pelos, la corteza al cuero cabelludo y la piel, la madera a los huesos, las venas a las venas, los nervios a los nervios, la matriz a ciertas entrañas»[9]. El juego de semejanzas oscurece los retratos y tapa las diferencias.

La planta acaba convirtiéndose en un animal invertido, cabeza abajo. Cesalpino sitúa el corazón, sede del alma, «en el lugar en el que creemos obligado situar, lógicamente, el principio vital…, en la parte inferior de la planta, allí donde el tallo se une a la raíz»[10].

Con esta conjunción de formas, no existe la especie en el sentido en el que la entenderá la época neoclásica, es decir, una permanencia de las

---

[8] *De plantis libri XVI,* lib. I, cap. XIV, Florencia, 1583, pág. 28.

[9] *Les livres intitulés de la Subtilité,* trad. francesa, París, VIII, 1584, pág. 196 b.

[10] *De plantis libri XVI,* lib. I, cap. I, pág. 3.

estructuras visibles por filiación. La producción de un semejante por los cuerpos vivos no expresa una necesidad de la naturaleza. Para explicar la formación de un ser es necesario, en cada caso, recurrir a la acción de Dios o sus delegados. La creación de cualquier ser requiere la unión de la materia y la forma, pero las propiedades de los seres vivos exigen además la intervención directa de las fuerzas que rigen el mundo. La conexión se ve asegurada por dos intermediarios: el alma inherente a cada individuo, de calidad variable según el lugar que ocupa éste en la jerarquía de los seres y no perceptible por los sentidos, y el calor innato, que es común a todos los seres vivos y perceptible.

La existencia de un alma que dé cuenta de las propiedades de los seres vivos se convierte entonces en algo tan necesario como hoy lo es la electricidad para explicar las tormentas. La implantación del alma en la materia del cuerpo se convierte así en el momento más importante de la generación. Ello constituye el acontecimiento natural, hoy diríamos biológico, por excelencia. En cuanto al calor innato, constituye la marca misma de la vida. Cuando llega la muerte, el calor se apaga y el cuerpo se enfría a pesar de conservar durante algún tiempo su forma. «Reconocemos a nuestro amigo», dice Fernel, «pese a que esté sin vida y el calor lo haya abandonado. El calor innato lo ha dejado.»[11] Todos los seres vivos están impregnados de ese calor, incluso «la serpiente, aunque su temperamento sea frío», lo mismo que «la mandrágora y la amapola y todas las hierbas de temperamento frío»[12].

Este calor, fuente de toda vida, lo ha distribuido el Creador en dos grupos. Uno está situado en los animales y plantas que poseen el poder de engendrar semejantes, en particular en el líquido seminal masculino capaz de activar y dar forma a la materia contenida en el líquido seminal femenino. Dice Montaigne: «Vemos que las mujeres producen por sí solas masas y pedazos de carne informes, pero para lograr una generación buena y natural precisan de la participación de otra simiente»[13]. El otro grupo está situado en el Sol, desde donde el calor puede activar directamente los elementos, la tierra, el agua y toda clase de desechos

---

[11] *Amblani physiologique libri IV, 1;* Opera, pág. 101.

[12] *De abditis rerum causis, II, 7;* Opera, pág. 590.

[13] *Essais, livre I, VIII,* La Pléiade, pág. 590.

para dar origen a los seres ruines, a «serpientes, saltamontes, gusanos, moscas, ratones, murciélagos, topos y todo lo que nace espontáneamente no de la simiente, sino de la materia pútrida y el fango»[14].

Para el siglo XVI la generación espontánea es tan natural y comprensible, si no más, que la generación por las simientes. Sólo la perfección de las formas puede justificar la complicación de los procesos. Dice Cardano: «La naturaleza habría buscado la generación de todos los animales con materia pútrida, pero como los perfectos requerían mucho tiempo para llegar a término, la materia no hubiera podido conservarse tanto tiempo sin movimiento y principalmente sin receptáculo, a causa de las variaciones de los tiempos; por estas razones la materia ha sido necesaria para abrigar el huevo o el fruto hasta llegar a su término, por ello la generación es hecha de simiente»[15].

Para describir la generación, el siglo XVI utiliza, si no modelos, al menos imágenes extraídas de dos actividades creadoras del hombre: la alquimia y el arte. La utilización del calor para transformar la materia constituye el método por excelencia de los alquimistas. Cuando éstos buscan alguna nueva combinación de mercurio, azufre y nitro lo hacen al calor de los hornos y alambiques. Igualmente, cuando la putrefacción transforma en moscas un pedazo de carne, se debe al calor desprendido por ésta; y cuando se elabora la simiente de los animales perfectos, es gracias al calor del cuerpo. La materia y los espíritus que la habitan se encuentran, según Paré, amasados, triturados, enviados del corazón al hígado, del hígado al cerebro, del cerebro a los testículos mediante «giros, vueltas y espirales como las de un sarmiento»[16]. Conforme progresan por los «recovecos y anfractuosidades del cuerpo», los humores y la simiente se impregnan de todas las virtudes necesarias para su futura labor: las virtudes concupiscibles, osíficas, carníficas, nervíficas, venífícas, etcétera. El juego de las fuerzas desconocidas se oculta tras el lenguaje. Gracias a las palabras, el misterio de la naturaleza se desvela poco a poco, pues en las palabras mismas reside una parte de las virtudes que designan. Pronunciarlas o escribirlas permite al final acceder, en cierta

---

[14] *De abditis rerum causis, 1, 8;* Opera, pág. 538.

[15] *De la subtilité, IX,* pág. 235 b.

[16] *De la génération de l'homme, pref.; Oeuvres*, II, pág. 634.

medida, a los secretos que entrañan, del mismo modo que la observación de las semejanzas abre el camino al conocimiento de las cosas. Pero, a fin de cuentas, «los padres no son más que la sede de las fuerzas que unen la materia con la forma. Por encima de los padres existe un Hacedor más poderoso. Es él quien da la forma al infundirles su aliento», precisa Fernel[17]. La producción de un ser por las fuerzas que ordenan el universo recuerda la de los objetos por el hombre. Provista de todos sus poderes, la naturaleza trabaja «como los arquitectos, albañiles y carpinteros que, tras poner los cimientos de una casa o construir la quilla de un navío, edifican el resto de la obra»[18]. O como «un escultor que saca formas del bronce y de las piedras»[19]. O también como «un pintor que retrata lo Natural»[20]. Es este retrato del natural el que da cuenta del parecido entre padres e hijos, por el cual la herencia se inserta en el marco de las analogías y las similitudes. La herencia representa en cierta medida el cometido del artista, esa mezcla de forma, de constitución, de carácter, pero no de materia, que se reencuentra generación tras generación por medio del líquido seminal. «¿Qué clase de monstruo», se pregunta Montaigne, «es la gota de simiente de la que procedemos, que lleva en su seno los rasgos no sólo de la forma corporal, sino también de los pensamientos e inclinaciones de nuestros padres? ¿Dónde esconde esta gota de agua analogías tales que de un progreso tan temerario y desordenado hará que el biznieto se parezca al bisabuelo y el sobrino al tío?»[21]

Pero el retrato al natural queda siempre expuesto a la influencia de múltiples fuerzas que pueden ejercerse mientras se desarrolla el embrión. Dice Paracelso: «La imaginación femenina recuerda al poder divino, sus apetencias externas se reproducen en el niño»[22]. A partir de ahí todo es posible. Todas las visiones, todos los sueños, todas las impresiones pueden abrirse camino hasta el pequeño en el vientre de su madre. Cada

---

[17] *De abditis rerum causis, I, 7,* Opera, pág. 535.

[18] *Paré, De la génération de l'homme, X; Oeuvres,* II, pág. 651.

[19] *Fernel, De abditis rerum causis, I, 3;* Opera, pág. 491.

[20] *Paré, ibid.,* pág. 638.

[21] *Essais, livre II, 37,* pág. 540.

[22] *Livre de Hohenheim, III; Oeuvres médicales,* pág. 222.

sensación del progenitor puede reflejarse en el niño, imprimirle una marca, una señal. «Cuando el pavo real empolla los huevos», afirma Fernel, «tapado con un lienzo blanco, engendra pavos reales completamente blancos y no de color abigarrado. Del mismo modo, la gallina que empolla huevos pintados de distintos colores produce polluelos de diferentes colores… Estos hechos se han visto confirmados por múltiples observaciones.»[23]

De este modo, en la realización de seres perfectos que engendran semejantes, la red de similitudes acaba por desdoblarse. Por un lado, la reproducción de la forma y del carácter está asegurada por el parecido que entraña la herencia. Por otro, y por medio de las sensaciones percibidas por los padres o bajo el efecto de su imaginación, el producto de la generación queda expuesto a las influencias del mundo exterior que puede dejar en el niño la marca de todas las analogías posibles. Se cierra así el círculo sobre el juego de las similitudes. ¿Por qué no iba a reflejarse el niño en el universo, si antes de su nacimiento el universo se refleja ya en el niño? A través de las idas y venidas por las que las fuerzas invisibles modelan sin descanso las semejanzas entre los seres, todas las combinaciones de formas son viables: los órganos, los miembros, los adornos de todos los seres pueden combinarse unos con otros. Entre las pequeñas variaciones, las anomalías mínimas que traducen algunos errores sin importancia, y esa amalgama en algún alambique por la cual se intercambian las partes de los diferentes seres vivos para producir monstruos, el paso se da imperceptiblemente. De la excrecencia que tiene «forma de cereza, de ciruela, de cuerno o de higo»[24] a la «yegua que pare un potro con cabeza humana»[25] son posibles todos los pasos intermedios.

La descripción del mundo vivo del siglo XVI está llena de los monstruos más variopintos. No sólo Aldrovando o Ambroise Paré les dedican libros enteros, sino que en cada «Historia» de los seres vivos, sean aves o peces, los seres fabulosos figuran al lado de los cotidianos. Estos monstruos reflejan siempre lo conocido, no hay ninguno que no recuerde algo, que sea totalmente distinto de lo que puede verse aquí o allá, sólo que no

---

[23] *Ambiani phisiologiae libri, VII*; Opera, pág. 239.

[24] *Paré, Des monstres et Prodiges, XVI; Oeuvres, III,* pág. 34.

[25] *Ibid., XX,* pág. 44.

se asemejan a un único ser, sino a dos, tres o más a la vez. Sus partes corresponden a animales distintos. Surge así el monstruo «con cabeza de oso y brazos de mono», el «hombre con manos y pies de buey», el «niño con cara de rana», el «perro con cabeza de pollo», el «león cubierto de escamas de pez», el «pez con cabeza de obispo» y todas las combinaciones imaginables. Los monstruos expresan siempre semejanzas, pero éstas se han convertido en heteróclitas y no se corresponden ya con el juego normal de la naturaleza. Las combinaciones y los signos descifrables no se refieren al orden del mundo, sino a los errores que pueden deslizarse.

«Los monstruos son cosas que aparecen contra el curso de la naturaleza», dice Ambroise Paré[26]. Contra el curso, pero no contra las fuerzas de la naturaleza, que no puede equivocarse. Si de vez en cuando hay algún error en los hombres o los animales, o incluso en las plantas, si se dan taras físicas o morales, los fallos nunca pueden imputarse a los principios, pues éstos ejecutan imperturbablemente los designios supremos. «Lo que llamamos monstruos», explica Montaigne, «no lo son para Dios, quien ve en la inmensidad de su obra la infinidad de formas que existen»[27]. Cuando una niña nace con dos cabezas o cuando un hombre tiene por cabellos «pequeñas serpientes bien vivas» es que hay exceso de semen. Cuando un hombre nace sin brazos o sin cabeza se debe, por el contrario, a una insuficiencia de semen. Si una mujer da a luz un hijo con cabeza de perro, no es culpa de la naturaleza, que «hace siempre su semejante» sino de la mujer, que ha cometido actos reprensibles con un animal. En lo que respecta a los disparates de la imaginación, ¿cómo no caer en la cuenta de que con frecuencia son producto de un pensamiento culpable? Cada monstruo procede de una falta y da testimonio de algún desajuste, de obra o de intención, que no se acomodan al orden del mundo. Física o moral, cada desviación que se produce al margen de la naturaleza da un fruto contra natura. Porque la naturaleza también tiene su moral.

Ahora bien, por muy heteróclito que pueda parecer este saber basado en una mezcla de observación, de hipótesis, de razonamiento, de filosofía antigua, de principios derivados de la escolástica, la magia y la astrolo-

---

[26] *Oeuvres, III,* pref., pág. 1.

[27] *Essais, livre II*, 31, pág. 692.

gía, no por eso deja de componer un cuadro perfectamente coherente. Todo lo que puede percibir la experiencia sensible se ordena en un conjunto en el que cada cosa y cada ser encuentran su sitio y se inserta en la red que la Voluntad Suprema teje en secreto.

El conocimiento de los objetos no puede disociarse de la fe. La formación de un ser no representa una operación fundamentalmente distinta de hacer girar un astro alrededor de la Tierra. La generación no es más que una de las recetas utilizadas cotidianamente por Dios para la conservación de un mundo creado por Él.

## El desciframiento de la naturaleza

En el siglo XVII la producción de un ser vivo se hace siempre a través de la generación, pero ésta cambia de papel y de estatuto. En menos de un siglo los cuerpos vivientes se pulimentan, por así decirlo. Se desprenden de su capa de analogías, semejanzas y signos para aparecer con la desnudez de las líneas y superficies que la mirada reconoce. Ya no es posible situar en un mismo plano la forma de una planta o un animal y las ideas que puedan tener acerca de ellos los viajeros, los historiadores o los juristas. Lo que se lee y lo que se oye no puede igualarse con aquello que se ve. El aspecto de los seres vivos y su estructura visible se convierten entonces en objeto de análisis y clasificación; y, dado que la estructura primaria de los organismos se repite incansablemente a grandes rasgos de padres a hijos, la generación representa el medio por el que se asegura el mantenimiento de las formas a lo largo de los años, lo que supone la permanencia de las especies. La generación de un ser no puede ya constituir un hecho aislado, único e independiente. Se convierte en la expresión de una ley que da fe de la regularidad del universo.

Con el siglo XVII se transforma la naturaleza misma del conocimiento. Hasta entonces, éste se articulaba con Dios, el alma y el cosmos. Ahora ya no se trata de encontrar los indicios que atestiguan secretamente las verdaderas intenciones de la naturaleza. Es cuestión de penetrar en ellos, captar los fenómenos, unirlos entre sí por leyes, hasta donde le sea posible al espíritu humano. El debate se limita a un diálogo entre el hombre y el mundo exterior.

Dice Descartes: «Sólo hay que tomar en consideración dos cosas: nosotros, que conocemos, y los objetos que deben ser conocidos»[28]. En esta nueva relación que se establece entre el hombre y la naturaleza el nudo de la acción se desplaza. El papel principal pasa de la voluntad divina al espíritu humano. El interés no se concentra ya en la creación de la naturaleza, sino en su funcionamiento en el presente. En lugar de una contemplación, de una exégesis, de una adivinanza, la ciencia de la naturaleza es un desciframiento. Para Galileo, «la filosofía está escrita en un gran libro que permanece siempre abierto ante nuestros ojos, pero que no se puede entender sin antes esforzarse en comprender la lengua y en conocer los caracteres con los que está escrito»[29]. Para Descartes, «si queremos leer un texto envuelto en caracteres desconocidos, sin duda no vemos en él ningún orden; pero, pese a ello, imaginamos uno no sólo para examinar todas las conjeturas que se pueden hacer sobre cada signo, cada palabra o cada idea, sino también para disponerlas de tal modo que permitan conocer, por enumeración, todo lo que sea deducible de ello»[30]. Para Leibniz, «el arte de descubrir las causas de los fenómenos, o las hipótesis, es como el arte de descifrar, en el que una conjetura ingeniosa ahorra muchos pasos»[31]. Más que por la voluntad divina que ordena secretamente los seres y las cosas, la ciencia de la naturaleza se interesa, a partir de entonces, por el descubrimiento de la clave, del sistema de coordenadas que el pensamiento humano intenta situar en la naturaleza para descubrir el orden. El posible codificador da paso al descifrador. Lo que importa no es tanto el código utilizado para crear la naturaleza como el buscado por el hombre para comprenderla; y ambos no necesariamente coinciden.

Dice Descartes: «Si para adivinar una clave alguien escribe con letras normales, se las compone para leer una B allí donde hay una A, y una C en todos los sitios donde hay una B, y de este modo sustituir el lugar de cada letra por la que le sigue según el orden alfabético, si leyendo de este modo encuentra palabras que tienen un sentido, no dudará un instante

---

[28] *Règles pour la direction de l'esprit, XII,* la Pléiade, pág. 75.

[29] *Il Saggiatore; Opere,* Florencia, VI, 1890-1909, pág. 232.

[30] *Ibid., X,* págs. 70-71.

[31] *Nouveaux essais sur l'entendement humain, IV,* 12, Flammarion, pág. 403

que ha dado con el verdadero significado de la clave, aunque podría darse el caso de que quien lo ha escrito le hubiese dado un sentido muy distinto al dar otra significación a cada letra»[32]. La plenitud del sentido y su coherencia son las que miden la exactitud de la clave descubierta. Del mismo modo, al interrogar a la naturaleza, es el poder explicativo el que determina el valor de las hipótesis o de las causas aludidas. El método de descifrado proviene de la combinatoria que constituye el instrumento esencial del examen científico. Para establecer un alfabeto del pensamiento, como quiere Leibniz, hay que reducir la complejidad a la simplicidad de las unidades que la componen. Del mismo modo que un número cualquiera debe concebirse como un producto de números primos, asimismo cualquier operación lógica debe reducirse a una combinación de elementos. Es la combinatoria de la lógica la que da la medida de lo posible.

Querer descifrar la naturaleza para descubrir en ella un orden exige la certeza de que el sistema de coordenadas no cambiará en el curso de la operación. Hay que estar seguro de que existe una regularidad en los fenómenos de la naturaleza. Hay que excluir la intervención de cualquier fuerza hostil, de cualquier «genio maligno, tan astuto y engañoso como poderoso, que», dice Descartes, «ha utilizado todos sus medios para engañarme»[33]. En tal situación, la naturaleza sólo puede concebirse como una armonía en la que el comportamiento de los seres y las cosas sigue necesariamente las reglas de un juego que será ya inmutable. Dios puede haber creado el mundo, puede haber dado el impulso inicial y decidido cuál sería su futuro, pero lo importante es que esta norma no pueda ser modificada, que la naturaleza no altere en absoluto los planes que le han sido dictados. De otro modo no es posible la ciencia.

Hasta el siglo XVI, todas las posibilidades consideradas por la imaginación humana eran realizables por la voluntad divina. En el siglo siguiente el universo está sometido a una cierta regularidad, a ciertas leyes o conjuntos de leyes que nadie, ni siquiera Dios, puede cambiar y cuya lógica se articula en un orden natural. Con independencia de que en el origen las leyes de la naturaleza hayan sido o no impuestas por un decre-

---

[32] *Les principes de la philosophie, IV,* 205, pág. 668.

[33] *Première médication*, pág. 272.

to divino, de que se pueda o no pensar en la existencia de otros mundos regidos por otras normas, de que se vaya de lo general a lo particular o en sentido inverso, este mundo existe y funciona. Todo se ordena, todo se relaciona y se armoniza no ya desde fuera por efecto de alguna fuerza oculta inaccesible a la razón humana, sino desde dentro por la articulación misma de las leyes. Descifrar la naturaleza consiste en limitarse al análisis específico de los fenómenos para hallar sus leyes. Las causas primeras se desvanecen ante las causas eficientes. El conocimiento no se basa ya en el discurso de Dios, sino en el discurso del hombre.

Para analizar objetos, para someterlos a la combinatoria y deducir su orden y su medida, es necesario poder representarlos mediante un sistema de signos. El signo ya no es la señal dejada en las cosas por el Creador para permitir al hombre deducir sus designios. Es parte integrante de la comprensión humana, producida y elaborada por el pensamiento para el análisis e instrumento necesario para el ejercicio de la memoria, la imaginación o la reflexión. De todos los sistemas de signos, el más perfecto es evidentemente el de las matemáticas. Con la ayuda de los símbolos matemáticos es posible dividir el continuo de las cosas, analizarlas, recomponerlas en combinaciones diversas. Para Galileo, el gran libro de la naturaleza está «escrito en lenguaje matemático, y los caracteres son triángulos, circunferencias y otras figuras geométricas»[34].

Durante la mayor parte del siglo XVII sólo es objeto de la ciencia lo que puede expresarse en lenguaje matemático, primero para imaginar un universo geométrico, y más tarde para representarlo en forma analítica. Con Newton, abandonado ya el universo geométrico, el cálculo pierde su significación puramente matemática, pero permite explotar los resultados de la observación y de la medida para deducir las leyes de la naturaleza. El análisis algebraico de los fenómenos físicos es lo que da al universo su ley de integración. Sólo la formulación matemática de las medidas físicas puede hacer admitir otra vez la intervención de una fuerza misteriosa, la gravitación, cuyo origen es desconocido, pero que exige el cálculo para relacionar la mecánica celeste con la terrestre. El papel decisivo de la física en los siglos XVII y XVIII no obedece únicamente a su transformación del universo, y tampoco a las nuevas funciones que asigna a la

[34] *Il Saggiatore; Opere, VI,* pág. 232.

observación, la experiencia y el razonamiento. La verdadera razón es que la física es la única ciencia de la naturaleza que puede expresarse con el lenguaje de las matemáticas. La física sustituye la palabra de la revelación por la de la lógica. En lugar de la oscuridad, de la ambigüedad, de la interminable exégesis de los textos sagrados, instaura la claridad, lo unívoco, la coherencia del cálculo. De Galileo a Newton, la física justifica los esfuerzos del pensamiento para establecer un orden en el mundo.

Limitada en un principio a los objetos de la matemática, la búsqueda del orden se extiende progresivamente a terrenos empíricos que, a primera vista, parecían fuera del alcance de un análisis similar. Poco a poco, la reducción de lo complejo a lo simple, la resolución de la complejidad aparente por la simplicidad subyacente, el juego de la combinatoria, se aplican a aquello que no es directamente conmensurable. Las cosas más variadas, las sustancias, los seres, incluso las cualidades, acaban por dejarse clasificar. Para instaurar un orden basta, cuando ello es posible, con establecer una ley general que permita agrupar objetos o proposiciones, aunque sean heterogéneos, fijar las clases y, dentro de los límites de dicho orden, recorrer a voluntad el conjunto del dominio de aplicación de la ley. Con la condición de encontrar el sistema de signos adecuado para representar estos objetos y encontrar sus relaciones. Porque, como dice Condillac[35], si un hombre quisiera inventariar por sí solo los objetos de su entorno, si quisiera realizar un cálculo por sí solo, se vería en la misma obligación de inventar signos que si quisiera comunicar su lista de objetos o el resultado de su cálculo. Sólo existe imaginación en la medida en que puede expresarse por una combinatoria de signos que ella misma ha imaginado.

## El mecanicismo

En el siglo XVII se van precisando las dos corrientes que surgen en el estudio de los seres vivos: la fisiología, derivada de la medicina, y la historia natural, relacionada con el inventario de los objetos de este mundo. Pero si la segunda va a poder constituirse en ciencia debido a que el

[35] *Essais sur l'origine des connaissans humaines*, Amsterdam, tomo I, sección 4, cap. I, 1746, pág. 179.

pensamiento de la época favorece el análisis de las estructuras visibles, la primera está todavía limitada por la falta de conceptos y de medios suficientes. Sería sin duda conveniente distinguir dentro de esta fisiología toda una serie de tendencias ideológicas, tendencias que varían según sus practicantes y según los objetos de estudio, los objetivos perseguidos o los fenómenos que se observan. Pero aquí sólo nos importan los conceptos que sirven de operadores en el estudio del mundo vivo; y aún no hay muchos que puedan desempeñar este papel. De hecho, durante toda esa época el funcionamiento de los seres vivos sólo puede aprehenderse en la medida en que refleja lo que ya es conocido.

En el universo del siglo XVII el centro de gravedad se ha desplazado. Es un universo en el que astros y piedras obedecen las leyes de la mecánica expresadas por el cálculo. A partir de entonces, para asignar un lugar a los seres vivos y para explicar su funcionamiento, sólo existe una alternativa. Los seres, o bien son máquinas de las que sólo cabe considerar formas, dimensiones y movimientos, o bien escapan a las leyes de la mecánica, y entonces hay que renunciar a cualquier unidad, a cualquier coherencia en el mundo. Ante esta opción, ni los filósofos ni los físicos, ni siquiera los médicos, dudarían: la naturaleza entera es una máquina, como la máquina es naturaleza. Dice Descartes: «Cuando un reloj marca las horas por medio de las ruedas que lo componen, esto es algo tan natural en él como para un árbol dar frutos»[36]. Para Hobbes, es indistinto considerar que el animal es una máquina o que un autómata cuyos miembros se mueven como los de un hombre tiene vida artificial. Esto no es ni una metáfora ni una comparación ni una analogía: es una identidad. Todos los cuerpos, sean astros, piedras o seres vivos, están sometidos a las mismas leyes del movimiento. El mecanicismo es tan natural y tan necesario en esta época como lo será una cierta forma de vitalismo en el inicio de la biología.

Hasta finales del siglo XVIII no existe una frontera claramente definida entre los seres vivos y las cosas. Lo vivo se prolonga en lo inanimado sin solución de continuidad. Todo es continuo en el mundo y, en palabras de Buffon, se puede «ir bajando gradualmente de la criatura más perfecta hasta la materia más informe, del animal mejor organizado al

---

[36] *Principes, IV, 203,* pág. 666.

mineral más tosco»[37]. No existe aún una división fundamental entre vivo y no vivo. Habitualmente, la discusión entre mineral, vegetal y animal sirve ante todo para establecer grandes categorías entre los cuerpos de este mundo. Esta clasificación puede basarse igualmente, como hace Charles Bonnet, en el grado de organización de los cuerpos, en su facultad de moverse, en su capacidad de razonar. Se distinguen entonces «los Seres brutos o desorganizados, los Seres organizados e inanimados, los Seres organizados y animados y, finalmente, los Seres organizados animados y razonables»[38].

Entre estos diferentes grupos no existen separaciones netas. «La organización aparente de las Piedras laminadas o divididas en capas», precisa Charles Bonnet, «tales como las pizarras, los talcos, etcétera, la de las Piedras fibrosas o compuestas de filamentos, tales como los amiantos, parecen constituir formas de transición de los Seres sólidos brutos a los sólidos organizados»[39]. La organización sigue representando sólo la complejidad de la estructura visible. Ni en el siglo XVII ni durante casi todo el siglo XVIII se reconoce esta calidad particular de organización que el siglo XIX llamará vida. Todavía no existen grandes funciones necesarias para la vida. Existen órganos que funcionan. El objetivo de la fisiología consiste en reconocer sus engranajes y su disposición.

En el siglo XVII no existe, pues, ninguna razón para reservar un lugar especial a los cuerpos vivos y sustraerlos a la gran mecánica que hace girar el universo. Sólo lo que se refiere claramente a las leyes del movimiento en el cuerpo de los animales es accesible al análisis. Tal es el caso de la osamenta de las bestias y de su tamaño, que no puede aumentar indefinidamente, observa Galileo, «ni en el arte ni en la naturaleza», sin romper la coherencia y dificultar el funcionamiento normal de los órganos. «Creo que un perrito podría cargar con dos o tres perros del mismo tamaño, pero dudo que un caballo pueda llevar a cuestas otro caballo de la misma talla»[40]. Este es también el caso del vuelo de las aves, en las

---

[37] *De la manière d'étudier et de traiter l'histoire naturelle; Oeuvres complètes, in-16, I,* París, 1774-1779, pág. 17.

[38] *Contemplation de la nature; Oeuvres complètes, VII,* Neuchatel, 1781, pág. 42.

[39] *Ibid., VII,* págs. 79-81

[40] *Discours concernant des sciences nouvelles,* trad. francesa, París, 1970, 2.ªjorn., pág. 107

que, observa Borelli, debe existir necesariamente alguna relación entre el peso del cuerpo, la envergadura de las alas y la potencia de la musculatura para permitir al organismo levantarse del suelo.

«Aunque tuviese alas, el hombre no llegaría a volar por carecer de músculos torácicos lo bastante fuertes»[41]. Esto se aplica sobre todo al caso de la circulación de la sangre por los vasos. Las fibras, dice Harvey, «sujetan el corazón como las amarras de un navío»; las válvulas tricúspides velan los ventrículos «como guardianes ante una puerta»; los ventrículos «expulsan sangre ya en movimiento, como un jugador que remata una pelota de volea, enviándola con más fuerza y más lejos que cuando golpea una pelota parada»[42]. Se suele decir que Harvey contribuyó a la instauración del mecanicismo en el mundo vivo al mostrar la analogía del corazón con una bomba y la de la circulación con un sistema hidráulico, pero esto es invertir el orden de los factores. En realidad, el corazón es accesible al estudio científico porque funciona como una bomba. Harvey puede hacer con la sangre experiencias similares a las que realiza Galileo con las piedras porque la circulación se analiza en términos de volúmenes, de flujo, de velocidad. El mismo Harvey no puede sacar conclusión alguna cuando se plantea el problema de la generación, desligado de esta forma de mecanicismo.

Así pues, en el siglo XVII la teoría de los animales-máquina viene dada por la naturaleza misma del conocimiento. Representa una actitud inconcebible en un Fernel o un Vesalio. Quizá podamos reconocer algunas trazas de mecanicismo en Aristóteles o en los atomistas griegos, pero éste tenía un carácter bien distinto. En primer lugar, porque en los griegos se trataba fundamentalmente de analogías de interés didáctico, mientras que en este siglo lo que interesa es unificar las fuerzas que rigen el mundo. En segundo lugar, porque para Aristóteles el motor de todo movimiento en un cuerpo vivo reside, en definitiva, en el alma. Para Descartes, en cambio, las propiedades de los objetos no pueden proceder más que de la ordenación de la materia. Esto es cierto para los movimientos de una máquina cuyas partes se han construido con el único fin de im-

---

[41] *De motu animalium, CCIV, Roma, ed. 1685, pág. 243.*

[42] *On the Motion of the Heart and the Blood in Animais, 1628, cap. 17; The works of W Harvey,* trad. Sydenham Soc., Londres, 1847, reed. 1965, págs. 78-80.

primirles un cierto movimiento. Esto es igualmente cierto para el cuerpo de un animal en el que es inútil invocar «ninguna otra alma vegetativa ni sensitiva ni ningún otro principio de movimiento y de vida que su sangre y sus espíritus movidos por el calor del fuego que arde continuamente en su corazón y cuya naturaleza no es distinta de la de los fuegos que hay en todas las cosas inanimadas»[43]. El mecanicismo debe aplicarse a todos los aspectos de la fisiología. No sólo al movimiento de los cuerpos y de los órganos, sino también a «la recepción de luces, sonidos, olores, sabores, del calor…, la impresión de sus ideas en el órgano del sentido común y de la imaginación, la retención o la huella de estas ideas en la memoria, los movimientos interiores de los apetitos y de las pasiones». Por ello mismo, es el conjunto de los cuerpos de este mundo, vivos o no, el que se halla situado fuera de cualquier interacción a distancia, de cualquier relación poco clara, de cualquier atracción o repulsión por simpatía o por antipatía. Ya nada es posible por el juego de las fuerzas mágicas. Todo deviene posible por el juego de las fuerzas físicas. Muy rápidamente se pone de manifiesto la insuficiencia de los recursos de que dispone el mecanicismo del siglo XVII para explicar el funcionamiento de los seres vivos. A medida que se descubre la complejidad de estos últimos, aumenta la dificultad para atribuir todas sus propiedades únicamente a las fuerzas que actúan sobre poleas, palancas y ganchos. En su forma inicial, el mecanicismo no puede resistir el peso creciente de las observaciones. La imagen que ofrece de los seres vivos, la de una máquina compuesta de engranajes capaces sólo de transmitir el movimiento recibido, no puede conducir más que a buscar fuera de la máquina su razón de ser y su fin. Una máquina sólo se explica desde el exterior. Hecha con una finalidad concreta, solamente sirve para desempeñar la tarea para la que ha sido concebida. Las tentativas de cambio que se manifiestan en el siglo XVIII, tanto en el sentido de limitar el mecanicismo como en el de acentuarlo, se derivan más de la metafísica que de la actitud científica de entonces. En su descripción del mundo vivo, Descartes había establecido dos dominios: Dios, quien tras crear el mundo y comunicarle su movimiento inicial deja de intervenir, y el pensamiento humano, cuya complejidad supera lo existente en los animales o lo realizable en los autómatas,

[43] *Traité de l'homme*, pág. 833.

de lo que da fe el lenguaje: una urraca, un loro y hasta un autómata pueden proferir palabras, pero no las ordenan para responder a lo que se les dice «como prueba de que dicen lo que piensan»[44]. Estos son los aspectos que tanto el materialismo como el vitalismo intentan refutar.

El animismo de esta época neoclásica tiene dos componentes. En primer lugar está la necesidad de valorar lo viviente. La materia viva está siempre un tanto empapada de magia y de un cierto fetichismo. En lo viviente se resumen todas las fuerzas de la naturaleza. Ahí la materia manifiesta propiedades casi milagrosas. La materia viva es activada, influida, transformada. Con su desfile de imágenes, metáforas, simpatías, lo viviente ocupa un lugar privilegiado en el mundo. Se sitúa ya de entrada por encima de todos los demás cuerpos. Se le atribuye siempre el coeficiente más alto. A su lado, los objetos inanimados pierden su color y su relieve. De las cosas a los seres, del polvo al pensamiento, existe una jerarquía de valores de complejidad creciente. En los seres vivos los fenómenos no son sólo más complejos: también son más perfectos. A una cualidad sin igual debe responder una causalidad sin igual. La perfección se transforma rápidamente en principio explicativo. La necesidad de valorar lo viviente en general, y el hombre en particular, se traduce en dos clases de antropomorfismo: la prolongación de la jerarquía hasta el infinito de una inteligencia soberana o, inversamente, la traslación al conjunto de las formas vivas de ciertas cualidades propiamente humanas. Una buena muestra de ello son las interpretaciones que da el siglo XVIII de la regularidad «admirable» de las celdillas de los panales de abejas. La arquitectura de las celdillas, su regularidad y simetría, han sido objeto de admiración desde la antigüedad. Hacia finales del siglo XVII, físicos y geómetras examinan estas estructuras más de cerca. Estudian las bases, miden los ángulos, calculan las relaciones. Para sorpresa de todos, se comprueba que cada celdilla corresponde precisamente a la mitad de la estructura que los cristalógrafos conocen como «dodecaedro romboidal». Se trata precisamente del orden cuya simetría permite llenar mejor el espacio en las condiciones en que se encuentran las celdillas. Cada una está en contacto con otras doce, seis en su plano, tres encima y tres debajo.

[44] *Descartes, Discours de la méthode, V*, pág. 165.

Cada celdilla se adhiere estrechamente a sus vecinas sin dejar ningún espacio entre ellas. Ante una disposición tan perfecta, caben dos actitudes: maravillarse o buscar una explicación basada en algún modelo mecánico. Asimismo, la referencia a la perfección es susceptible de adoptar dos formas. De entrada podemos atribuir a la abeja cualidades humanas, como hace Réaumur. Así, el dodecaedro romboidal es el exponente del arte de la abeja, de su destreza arquitectónica, incluso de su sentido de la economía. Dice Réaumur: «Convencido de que las abejas utilizan el fondo piramidal que les parece mejor, sospeché que la razón o una de las razones que las había empujado a ello era economizar la cera; puesto que, de entre las células de igual capacidad y fondo piramidal, la que podía hacerse con menos material o cera era aquella que en cada rombo tenía dos ángulos de unos 110 grados aproximadamente y dos de alrededor de 70 grados»[45]. El sentido del ahorro se basa, por consiguiente, en un sólido conocimiento de la matemática. Pero a base de prestigiar a la abeja se acaba por rebajar al hombre. Entonces, sin dejar de maravillarnos, podemos expresar algunas reservas sobre las cualidades atribuidas a las abejas, como hace Fontenelle: «La gran maravilla es que la determinación de estos ángulos supera en mucho las capacidades de la geometría vulgar y forma parte de los nuevos métodos basados en la teoría del Infinito. En última instancia, estas abejas sabrían demasiado y el exceso de su gloria sería su ruina. Hay que remontarse hasta una Inteligencia infinita que las hace actuar ciegamente bajo sus órdenes»[46]. Para el matemático, atribuir conocimientos de geometría elemental a un animal aún puede pasar. ¡Pero no de cálculo infinitesimal!

La otra actitud posible ante esos mismos alvéolos se fundamenta en un análisis que ignora la perfección y sitúa lo maravilloso en el lugar que le corresponde. Sólo la figura y el movimiento deben justificar la regularidad de las estructuras. Se puede entonces investigar, como hace Buffon, en qué condiciones aparecen estas ordenaciones geométricas. Tales formas hexagonales se encuentran con frecuencia en los cuerpos minerales cristalinos, pero a veces se encuentran también en los seres vivos: en el

[45] *Des gateaux de cire. Mémoires pour servir... Morceaux choisis.* París, 1939, págs. 101-102.

[46] *Histoire de l'académie Royale*, 1739, pág. 35.

estómago de los rumiantes, en los cuerpos en proceso de digestión, en ciertos granos y ciertas flores. Aparecen siempre que objetos de forma similar se ven sometidos a fuerzas sensiblemente iguales, pero de signo contrario. En ciertos peces, por ejemplo, las escamas en crecimiento se obstaculizan mutuamente, lo que hace que tiendan a ocupar el espacio disponible de la manera más económica y acaben por adoptar la configuración hexagonal. También se puede ensayar la construcción de modelos mecánicos en los que cuerpos cilíndricos o esféricos sean sometidos a presiones iguales. Dice Buffon: «Si se llena un recipiente cilíndrico con guisantes o, mejor, cualquier otro grano cilíndrico y se cierra inmediatamente después de haber vertido tanta agua como admitan los intersticios que quedan entre los granos, y se hace hervir el agua, todos los cilindros se convierten en columnas de seis lados. Vemos claramente que la razón es simplemente mecánica: cada grano, cuya figura es cilíndrica, tiende a ocupar el mayor volumen posible en un espacio dado; la comprensión recíproca hace que los granos adquieran una forma necesariamente hexagonal. De igual modo, cada abeja intenta ocupar el mayor espacio posible dentro de un espacio determinado; dado que el cuerpo de las abejas es cilíndrico, es también necesario que sus celdillas (alvéolos) sean hexágonos, por la misma razón de obstaculización recíproca… No se quiera ver que esta regularidad más o menos grande depende de algo más que el número y la forma, y en ningún caso de la inteligencia, de estos animalitos; cuanto más numerosos son, más fuerzas contrapuestas entran en juego y, por consiguiente, más tensión mecánica, más regularidad forzada y más perfección aparente hay en sus producciones»[47]. A partir de ahí, la forma de los alvéolos puede ser considerada sin referencia alguna a la menor inteligencia. Lo que no resta ninguna belleza a los panales de miel, ni poesía a las abejas.

El otro componente del animismo en esta época es una reacción contra el mecanicismo cartesiano y los abusos del mismo, sobre todo cuando se lleva la lógica al extremo de D'Holbach y La Mettrie. Es absurdo, señala Hartsoeker, abordar el estudio de los seres vivos con la «opinión de que casi todo se hace con las solas leyes de la mecánica, sin la ayuda

---

[47] *Discours sur la nature des Animaux;* Oeuvres complètes, in-16, V, págs. 380-381.

de un alma y una inteligencia»[48]. En el siglo XVII el animismo recupera una vieja tradición reavivada por la alquimia y la medicina. Pero actúa más *contra* una tendencia materialista que a favor de demostrar la existencia de fenómenos específicos de lo vivo. Es ante todo una hostilidad hacia el ateísmo, hacia la irrupción del azar como una de las fuerzas que gobiernan el mundo. No se quiere admitir que las causas, como dice Stah1[49], dan lugar sólo a casos fortuitos bajo la influencia de sus acciones. La perfección de los seres, sus propiedades, su generación, exigen un principio desconocido, un Interrogante fuera del alcance de todo conocimiento. Es necesaria una fuerza espiritual, una psique, para ejecutar las voluntades divinas, pues es imposible justificar de otra manera la finalidad de los seres vivos. Este agente misterioso recibe nombres diversos: será primero el Alma, según la tradición, más tarde la Inteligencia y hasta la «naturaleza plástica». A finales del siglo XVIII cambiará algo de naturaleza y se convertirá en la «fuerza vital». Ya no se trata entonces de un principio central, de un poder que, asentado en el corazón del organismo, rige sus actividades. Es una cualidad particular de la materia constituyente de los seres vivos, un principio que se extiende por todo el cuerpo, se aloja en cada órgano, en cada músculo, en cada nervio, para conferirle sus propiedades. Cualquier parte del cuerpo posee entonces un «sentimiento», un «tacto», una «disposición» que sustenta sus actividades. Pero, si bien el vitalismo de finales del siglo y de comienzos del siglo siguiente se presenta como una etapa decisiva para la separación entre seres vivos y no vivos y para la constitución de una biología, el animismo de esa época apenas funciona como operador del conocimiento. No porque animistas o vitalistas realicen menos observaciones que los mecanicistas, sino porque dichas observaciones raras veces tienen una motivación vitalista, y casi nunca pretenden poner en evidencia una fuerza vital. El vitalismo suele intervenir tras la observación, no para verla, sino para interpretarla. No es el vitalismo lo que guía el escalpelo de Willis en su disección del cerebelo para determinar sus conexiones, ni la mirada de Hartsoeker cuando distingue al microscopio los animálculos

[48] *Cours de physique, VII,* La Haya, 1730, pág. 71.

[49] *Recherche sur la différence entre machine et organisme, XXXIV;* Oeuvres médico-philosophiques et pratiques, t II, París, 1859-1863, pág. 289.

en el esperma masculino. Y cuando Swammerdam pone en evidencia la metamorfosis de los insectos, poco importa que vea en ella la acción del alma y la constancia de la Providencia. Lo que importa en esta época es, ante todo, borrar de los objetos y los hechos el halo de creencias y fantasías que enmascaran sus contornos. Se trata, ante todo, de librar a los seres vivos y a las cosas de lo misterioso y lo maravilloso, de situarlos dentro de los límites de lo visible y lo analizable, en definitiva, de transformarlos en objetos de ciencia. Por ello, pese a la precariedad de medios de que dispone, el mecanicismo representa la única postura acorde con el conocimiento de la época. Incluso los animistas utilizan analogías tomadas de los mecanicistas para describir su trayectoria. «Quien decide dar cuenta de los fenómenos de la naturaleza», señala Hartsoeker, «se asemeja a un hombre que se encuentra ante una máquina sumamente complicada que sólo puede ver y examinar desde fuera»[50], y debe comprender su funcionamiento. A fin de cuentas, el animismo del siglo XVII representa más una filosofía y una moral que una actitud de examen científico.

De hecho, con Newton el mecanicismo cambia de naturaleza y, al incorporar el mundo de las sustancias, da nacimiento a una química. En su representación del mundo inanimado, la física combina las leyes del movimiento y la naturaleza corpuscular de la materia. Esta ya no es un sustrato homogéneo divisible hasta el infinito, sino que se compone de un número incontable de partículas aisladas, separadas entre sí y no idénticas. A la materia y el movimiento que constituyen el mundo de Descartes se añade, en el de Newton, el espacio, es decir, un vacío en el que se mueven las partículas. Lo que mantiene las partículas en su lugar, lo que las une entre sí para formar un universo coherente, es la atracción. Esta no es un constituyente del universo. No participa en su construcción. Pero, junto con todos los átomos que lo forman, elabora una red de dependencias que da al mundo su cohesión. Es el concepto de atracción el que proporciona a los químicos la fuerza que permite prescindir de las influencias astrales por las que la alquimia unía los metales a las estrellas y los planetas. Cuando se mezclan sustancias éstas no permanecen inertes, sino que unas son desplazadas por otras. Se observan así relaciones entre cuerpos distintos que los hacen unirse con más o menos facilidad

[50] *Suite des Eclaircissements sur les Conjectures physiques,* Amsterdam, 1712, pág. 55.

entre sí. Siempre que dos sustancias que tienen, como dice Geoffroy, «alguna disposición a unirse entre sí» se encuentran unidas, si aparece una tercera que tiene más relación con una de las dos, se le une «haciendo abandonar a la otra»[51]. La fuerza que liga de esta forma ciertos corpúsculos de naturaleza distinta se denomina «afinidad». Ya no se trata de un principio mágico, de una virtud similar a aquellas que la alquimia atribuía a las sustancias. Es una propiedad de los cuerpos que puede medirse determinando el orden de desplazamiento de los unos por los otros.

Poco a poco se van perfilando grupos, familias de cuerpos que poseen ciertas propiedades comunes, como los ácidos o las bases. Cada miembro de una familia forma combinaciones con cada miembro de la otra. Se puede así clasificar las sustancias a la manera de las plantas, y para lograrlo hay que seguir el mismo camino que los botánicos: la clasificación que utiliza Lavoisier, las operaciones efectuadas y el método seguido son los mismos que los empleados por Linneo. Como en el caso de las plantas, interesa reconocer el carácter principal de las sustancias y nombrarlas en función de ese carácter. En las ciencias físicas, en realidad, la palabra debe evocar la idea y la idea debe describir el hecho, pues, como dice Lavoisier, «son tres marcas del mismo cuño»[52]. Al ser la química ante todo una ciencia analítica, la denominación de los cuerpos reviste una importancia particular: «Un método analítico es un lenguaje y un lenguaje es un método analítico». Hasta entonces existía una gran heterogeneidad en el lenguaje de la química. Ciertas expresiones introducidas por los alquimistas tenían un carácter un tanto enigmático y sólo tenían sentido para los adeptos. Otros términos, por el contrario, habían sido asignados a los cuerpos no según sus propiedades, sino según el azar de las circunstancias, de su descubrimiento o de su aspecto. Así, los químicos manejaban el «aceite de tártaro incompleto», la «mantequilla de arsénico» o las «flores de cinc». Para Lavoisier, hay que introducir el espíritu analítico en la química, y esta operación sólo puede realizarse mediante el perfeccionamiento del lenguaje. En primer lugar, existen unas sustancias sim-

---

[51] *Table des différents Rapports observés en Chymie; Traité de la Matière médicale, I,* París, 1743, pág. 18.

[52] *Traité de chimie,* París, 2.ª ed., 1743; dise. prelim.; pág. 6.

ples no descomponibles mediante el análisis químico. El primer paso es nombrar estas sustancias. Dice Lavoisier: «He designado hasta donde he podido las sustancias simples con palabras sencillas… de tal modo que expresen la propiedad más general, más característica de la sustancia»[53]. En cuanto a los cuerpos compuestos, formados por la reunión de varias sustancias simples, hay que designarlos con nombres compuestos. Dado que el número de combinaciones binarias aumenta rápidamente con el de nombres, es necesario agruparlos en clases para evitar la confusión. «El nombre de las clases y de las flores está en el orden natural de las ideas, el que designa la propiedad común a un gran número de individuos; el de las especies, en cambio, es el que nos retrotrae a las propiedades particulares de ciertos individuos»[54]. Los ácidos, por ejemplo, están formados por dos sustancias consideradas simples. Una confiere la propiedad de acidez común a todos ellos, en la cual debe basarse el nombre de la clase o el género. La otra, por el contrario, caracteriza un ácido concreto, y por lo tanto debe determinar el nombre específico[55]. Lo mismo vale para otras clases de cuerpos: óxidos metálicos, sustancias combustibles, etc. De este modo las sustancias se hacen accesibles a la ordenación y la medición. Pueden clasificarse y nombrarse, y sus propiedades pueden medirse. La química se constituye así en una ciencia con técnicas, lenguaje y conceptos propios.

Con el desarrollo de esta forma modificada del mecanicismo representada por la química, un nuevo dominio de la fisiología se convierte en objeto de estudio. Harvey había podido analizar la circulación de la sangre en el siglo XVII porque era la única de las grandes funciones basada casi exclusivamente en las leyes del movimiento, porque el corazón es fina bomba y la sangre un líquido sometido a las leyes de la hidráulica. Del mismo modo, en el siglo XVIII se hacen accesibles al análisis las dos funciones que son competencia de la química, sus conceptos y sus métodos: la digestión y la respiración. Si Réaumur y Spallanzani pueden abordar el estudio de la digestión, es porque ésta, como dice Réaumur, «es llevada a cabo por la sola acción de un disolvente y por la fermenta-

[53] *Ibid.*, págs. 18-19.

[54] *Ibid.*, pág. 20.

[55] *Ibid.*, pág. 21.

ción que origina»[56]. El jugo gástrico provoca una serie de reacciones químicas, actuando «sobre las carnes y los huesos como el agua regia sobre el oro». De igual modo, si Lavoisier puede comprender la respiración es porque la respiración de un ave y la combustión de una vela pueden considerarse objetos de estudio similares y ambos pueden analizarse con los mismos conceptos, las mismas técnicas y las mismas medidas. El paralelismo con la combustión lleva a Lavoisier a ligar la respiración con otras funciones, al menos con lo que puede analizarse en los términos y según los conceptos de la física y de la química. Con la digestión, ya que a finales del siglo XVIII no se concibe el fuego sin consumo de combustible y además «si los animales no repusiesen con los alimentos lo que pierden con la respiración, muy pronto faltaría aceite al candil y el animal perecería como se apaga un candil cuando le faltara alimento»[57]. Con la circulación, ya que es a todas luces necesario llevar el combustible al candil. Con la transpiración, para poder evitar el aumento de temperatura que necesariamente acompaña a un fuego constante. En el funcionamiento de cualquier órgano existe, pues, una parcela estudiable con las técnicas de la química; incluso en el cerebro y en el pensamiento.

«Se puede llegar a saber cuántas libras de peso suponen los esfuerzos del hombre que hace un discurso, de un músico que toca un instrumento. Se podría asimismo calcular lo que hay de mecánico en el trabajo del filósofo que reflexiona, del hombre de letras que escribe, del músico que compone.[58]

Para Lavoisier, el animal se analiza en términos de máquina. No una máquina que se rige únicamente por la forma y el movimiento, sino por unos principios sumamente variados, pues se descubren fenómenos eléctricos hasta en el músculo de una rana. El modelo más adecuado para describir un cuerpo vivo es el de una máquina de vapor con una fuente calorífica que hay que alimentar, un sistema de refrigeración y mecanismos para ajustar las operaciones de las distintas partes, coordinarlas y

---

[56] *Second mémoire sur la digestion Mém. Acad. Sc.,* París, 1752; Oeuvres choisies, pág. 202.

[57] *Premier mémoire sur la Respiration des Animaux (Seguin y Lavoisier) Oeuvres, Imprimerie Impériale, II,* París, 1862, pág. 691.

[58] *Ibid.*, pág. 697.

armonizarlas. «La máquina animal», dice Lavoisier, «está gobernada principalmente por tres reguladores fundamentales: la respiración, que consume oxígeno y carbono y suministra calórico; la transpiración, que aumenta o disminuye según la cantidad de calórico que hay que llevarse, y finalmente la digestión, que devuelve a la sangre lo que se pierde con la respiración y la transpiración»[59]. Todas estas parcelas de la fisiología pueden ser objeto de análisis porque se han hecho accesibles a los métodos y conceptos de la física y la química. En correspondencia, las analogías observadas y los modelos utilizados contribuyen a transformar radicalmente la representación que se tiene de los seres vivos a finales del siglo XVIII. Todo se ensambla en el funcionamiento de un organismo, todo se conecta y se articula. Tras las formas se perfilan las exigencias de la fisiología. Un cuerpo vivo no es simplemente una asociación de elementos, una yuxtaposición de órganos que funcionan: es un conjunto de funciones que responden cada una a exigencias precisas. No sólo los órganos dependen unos de otros, sino que su presencia y su disposición proceden de las necesidades impuestas por las leyes de la naturaleza que rigen la materia y sus transformaciones. Lo que da sus propiedades a los seres es un juego de relaciones que unen secretamente las partes para que funcione el todo; es la organización oculta tras la estructura visible. Es entonces cuando podrá surgir la idea de un conjunto de cualidades propias de los seres animados, que el siglo XIX llamará vida.

## Las especies

Durante todo el siglo XVII los seres vivos pueden ser conocidos y analizados ante todo por su estructura visible. La vieja red de similitudes es sustituida por la de las comparaciones. El conocimiento de las cosas se fundamenta en sus relaciones, sus identidades y sus diferencias. Si lo que se busca y lo que se encuentra participan de «una naturaleza determinada», entonces la comparación es clara y sencilla. De otro modo se hace necesario un prolongado análisis de los objetos para deducir la naturaleza común tras la complejidad de las proporciones. El análisis y la comparación se fundan en la atribución de valores distintos a las cualidades de los

---

[59] *Premier mémoire... Oeuvres, II,* pág. 700.

objetos reconocibles por los sentidos. El universo sólo puede aprehenderse a través de lo visible. Cuando vemos un astro ni lo tocamos, ni lo probamos, ni lo olemos. Pero quizá nada haya sido tan difícil para el espíritu humano como liberarse de los tópicos e ideas sobre el mundo vivo acumuladas durante siglos y que, en palabras de Tournefort[60], «fatigan la imaginación», ni reducir los seres a los límites que asigna la mirada. Sólo a finales del siglo XVII se rechaza definitivamente toda analogía dudosa, todo lazo invisible y toda similitud sospechosa que, en palabras de Linneo, «no sean evidentes para todo el mundo y sólo se introduzcan para peor gloria del arte»[61]. Sólo entonces puede desarrollarse la historia natural, que tiene por objeto la estructura visible de los seres vivos y por meta su clasificación.

Para hacer historia natural es necesario, en primer lugar, observar los seres y describirlos, es decir, consignar lo que la mirada distingue en un ser, rechazando todo aquello que «no se aparece a los sentidos sin el recurso de una lupa»[62]. Es cuestión de reducir el ser a su aspecto visible y traducir en palabras su forma, tamaño, color y movimiento. La descripción debe prescindir de los detalles; en cambio, no debe silenciar ninguna de las «notas singulares», ninguno de los elementos esenciales. Debe ser precisa y concisa, pues «es insensato», dice Linneo, «abundar en demasía allí donde con poco basta»[63].

Así pues, la historia natural exige cualidades particulares junto con un sujeto y un objeto. Para ser naturalista, primero hay que ser capaz de renunciar a las imágenes a priori y saber observar. Pero no basta con mirar. Hay que observar lo que interesa y nada más. El naturalista no puede contentarse con examinar un organismo en su conjunto. Tiene que analizarlo, estudiar sus partes, retener lo esencial de sus características. En lo que respecta al objeto de estudio, debe prestarse a las exigencias del análisis. Sin lugar a dudas, la planta es más sencilla de detallar que el animal; está menos henchida de pasiones y de signos secretos. Por sus

---

[60] *Eléments de Botanique, I,* París, 1694, pág. 4.

[61] *Philosophie Botanique, 299,* París, 1788, pág. 277.

[62] *Tournefort, Introduction à la Botanique, Muséum d'Histoire Naturelle,* París, 1957, pág. 284.

[63] *Philosophie Botanique, 291*, pág. 271.

movimientos, por su estremecimiento continuo, el animal cambia de forma sin cesar. En su inmovilidad, la planta despliega permanentemente sus formas y dibujos ante el observador. Tras la cubierta del animal se oculta una zona de misterio; bajo el pelo, la pluma o el caparazón se percibe confusamente el mundo secreto de los órganos, toda la maquinaria de las entrañas. En la planta, en cambio, nada queda en la sombra. Todos los órganos están expuestos a la mirada, toda su funcionalidad se hace patente. Y es obvio, observa Tournefort, «que se comprende mejor la estructura de una máquina y que se sabe más fácilmente el número de piezas que la componen cuando se conocen las funciones a las que está destinada cada pieza»[64].

A primera vista, la estructura de un animal, incluso de una planta, constituye una arquitectura muy compleja. Es difícil comparar las formas en su conjunto. Pero cuando se extrae la red de semejanzas y diferencias, no de los organismos en su conjunto, sino del análisis de sus partes, entonces la complejidad se convierte en simplicidad. Lo que es visible en una planta se descompone en un juego de líneas, superficies y volúmenes. La estructura de conjunto se reduce a una reunión de figuras más o menos geométricas. A condición, sin embargo, de que estén convenientemente elegidas las cualidades que hay que observar, pues todas las propiedades visibles no ofrecen la misma garantía de generalidad. El color, por ejemplo, está demasiado sujeto a variaciones individuales. La descripción, dice Linneo, debe hacerse «mediante la utilización de los solos términos del arte, si bastan, describiendo las partes según el Número, la Figura, la Proporción y la Situación»[65]. Así pues, no se debe comparar tal planta con tal otra, sino el número de sus estambres, la forma de sus cálices, la situación de sus anteras, la proporción de sus estambres y pistilos. A fin de cuentas, cualquier planta puede representarse como una reunión de elementos de número y proporción determinados. Cada uno de estos elementos puede variar hasta el infinito en cada uno de sus parámetros, y cada variedad de cada elemento puede volver a reunirse con las de todos los demás en un número infinito de combinaciones. La botá-

[64] *Eléments de Botanique, I,* 2ª parte, pág. 47.

[65] *Philosophie Botanique, 327*, pág. 306.

nica se convierte en una especie de combinatoria de posibilidades casi ilimitadas.

Son estas agrupaciones de elementos las que se trata de ordenar y clasificar. Tarea particularmente delicada por diversas razones. Primero, por la diversidad del mundo viviente: el número de variedades conocidas, que suman varias decenas de miles a finales del siglo XVII, aumenta sin cesar, y el microscopio ha privado de todo límite al mundo viviente. Segundo, por su continuidad: hasta el siglo XIX no sólo no existe una frontera bien definida entre los seres y las cosas, sino que el mundo vivo forma una trama ininterrumpida. Todo es progresivo, gradual. La naturaleza no da saltos. Tiende puentes entre los Cuadrúpedos, las Aves y los Peces, traza prolongaciones mediante las que todo se acerca, se une, se sostiene. «Envía al murciélago a revolotear entre las aves», dice Buffon, «mientras encierra al tatú en un caparazón de crustáceo; ha construido el molde del cetáceo sobre el molde del cuadrúpedo recortando únicamente la forma en la morsa y la foca, que de la tierra en que nacen se zambullen en el agua y van al encuentro de esos mismos cetáceos, como para demostrar el parentesco universal de todas las generaciones salidas del seno de la madre común»[66]. Se pueden ordenar los seres en categorías. La naturaleza, sin embargo, no conoce clases. Entre dos seres de tipos distintos pero vecinos la diferencia es mínima, «de tal modo que», dice Robinet, «no podría ser menor sin que uno fuese precisamente repetición del otro, ni mayor sin dejar una laguna»[67]. Esos dos seres no pueden estar más próximos. El paso de uno a otro no admite ni intermediario ni vacío. Dice Charles Bonnet: «Si entre dos seres cualesquiera existiese un vacío, ¿cuál sería la razón del paso de uno a otro?»[68] Entre el grado más bajo y el más elevado de la serie de los seres, existe, pues, un número infinito de intermediarios. El conjunto de los seres supone una serie continua, una cadena ininterrumpida que, en palabras de Bonnet, «vemos serpentear por la superficie del Globo, penetrar en los abismos del Mar, elevarse en

[66] *Les Pingouins et les Manchots;* Oeuvres complètes, ed. Flourens, in-4, VIII, 1853-1857, pág. 589

[67] *De la Nature, IV,* Amsterdam, 1766, pág. 5

[68] *Contemplation de la Nature, II, 10;* Oeuvres, VII, pág. 52.

la Atmósfera y hundirse en los Espacios celestes»[69]. Sólo nuestra ignorancia nos impide ver ciertos eslabones de la cadena y no nos deja entrever más que eslabones mal unidos. La unión entre los individuos de toda clase es tan grande que, según Adanson[70], su conjunto podría «formar un todo, un único ser universal, del que los individuos serían las partes».

La tercera dificultad para ordenar el mundo viviente estriba en que, como dice Buffon, «en la naturaleza no existen más que individuos, y los géneros, los órdenes y las clases sólo existen en nuestra imaginación»[71]. En el límite, para reflejar fielmente la naturaleza, una clasificación de los seres debería ramificarse hasta el infinito. Debería comprender tantas categorías como individuos pueden existir. Pero entonces no sería posible la ciencia. Para hacer botánica hay que llegar a un acuerdo con la naturaleza. Es necesario, según la imagen de Tournefort, «hacer ramilletes con las plantas semejantes y separar las que son distintas»[72]. Se trata de vislumbrar «líneas de separación» allí donde todo parece continuo, de encontrar vacíos allí donde la naturaleza parece ignorarlos. Aun en el caso de que el universo no esté verdaderamente dividido, nosotros lo vemos así. Esto basta para justificar las tentativas de clasificación, y la función del naturalista consiste en encontrar las separaciones más precisas. «Este orden tan necesario», dice Fontenelle[73] en su *Eloge de Tournefort*, «no ha sido establecido por la naturaleza, que ha preferido una confusión magnífica para mayor comodidad de los físicos, y son ellos quienes, pese a ella, deben poner orden y crear el Sistema en las Plantas».

Para clasificar las plantas es necesario poder representarlas en un sistema de símbolos, es decir, nombrarlas. Nombrar una planta supone ya clasificarla. Ambas operaciones están inextricablemente ligadas. Corresponden a dos aspectos de una misma combinatoria que debe articularse con la combinatoria de las estructuras visibles, de las superficies y volúmenes que se reúnen para crear la diversidad de las plantas. El lugar de encuentro, el punto de articulación entre lo que se puede ver, nombrar y

---

[69] *Ibid.,* pág. 51.

[70] *Familles de Plantes,* París, 1763, pág. 164.

[71] *De la manière d'étudier...;* Oeuvres complètes, in-16, I, pág. 54.

[72] *Éléments de Botanique,* pág. 13.

[73] *Oeuvres, V, París, 1767*, págs. 219-220.

clasificar, es el carácter. Para Linneo: «La Planta es conocida por su nombre y, recíprocamente, el nombre por la Planta; es el efecto del carácter propio de una y otro, trazado en aquélla, escrito en éste»[74]. Junto con los detalles de su estructura, el carácter constituye la «marca propia»[75] de la planta. Describir es decirlo todo, reunir todos los datos visibles. Encontrar el carácter, por el contrario, es agrupar las propiedades comunes a ciertos individuos por las cuales se distinguen de los otros. Ante todo, es elegir entre el desorden de lo visible las notas particulares que, para el espíritu, deben quedar indisolublemente ligadas a la planta y reemplazar la imagen de ésta con todos sus detalles. Al considerar sólo un carácter, al nombrarlo y retenerlo, en definitiva, al reducir la planta al carácter, el pensamiento se libera del caos de las imágenes sensibles. Sólo entonces puede efectuar su trabajo de clasificación.

La clasificación representa siempre una pirámide, una jerarquía que comprende dos conjuntos de clases situadas a niveles distintos, incluyendo cada clase de un nivel determinado una o varias subclases de nivel inferior. Cada jerarquía puede funcionar a distintos grados de complejidad. Simple, como en la «disposición sinóptica», donde se reduce a un conjunto de llaves dicotómicas sucesivas[76]. Más elaborada, como en las clasificaciones «sistemáticas» en las que cada clase engloba más de dos clases del nivel inferior. En el siglo XVIII el conjunto del mundo vivo se dispone en una jerarquía de cinco niveles: el Reino, la Clase, el Orden, el Género y la Especie. Esta última está formada a su vez por la reunión de variedades, cuya diversidad, según Linneo[77], no proviene más que de «una causa accidental, debida al Clima, al Terreno, al Calor, a los Vientos, etcétera». La distribución de los seres vivos en cinco niveles representa en sí misma una simple convención. Significa que un organismo sólo puede considerarse convenientemente clasificado cuando se le puede encasillar, explícita o implícitamente, en un grupo definido a cada nivel.

---

[74] *Philosophie Botanique,* 261, pág. 246

[75] *Tournefort, Introduction à la Botanique,* pág. 284

[76] *Linneo, Philosophie Botanique,* 153, págs. 128-129

[77] *Ibid.*, 158, pág. 132

Para construir semejante edificio existen dos técnicas, según se proceda por una suerte de lógica deductiva o por empirismo: los sistemas y el método. Los sistemas son mucho más antiguos que el método, pues descienden de Aristóteles a través de la escolástica. Construir un sistema supone ya tener una cierta idea de la naturaleza de los objetos que se pretende clasificar, así como de sus relaciones mutuas. Hay tantos sistemas como ideas, incluso tantos como botánicos. El número de variables permite adaptar la clasificación a los datos empíricos según la precisión deseada. Todos los sistemas buscan la ordenación de caracteres y la relación lógica que se preste a la mejor articulación de las clases. Dice Tournefort: «Es necesario recurrir al arte de las combinaciones. Las partes de las plantas deben estar tan bien combinadas entre sí, una a una, que en último término puedan elegirse aquéllas a partir de las cuales puedan constituirse los caracteres genéricos que aportan más luz y son más conformes a la experiencia»[78]. Se analizan, pues, las posibilidades combinatorias que brinda la utilización de tal o cual parte de una planta y se opta por aquélla cuyo número de combinaciones posibles supera el de las combinaciones existentes en la naturaleza. Es la elección arbitraria de los criterios lo que impone las separaciones que se establecen.

Con el método, por el contrario, no es necesaria ninguna concepción a priori. Basta comparar los objetos con rigor y minuciosidad para deducir las diferencias. Sólo un método sería posible. El procedimiento consiste en elegir arbitrariamente una planta de referencia, superponerle de alguna manera las otras plantas y señalar meticulosamente todas las desviaciones y excesos. Así obraba Adanson: «Hacía primero una determinación de cada planta, poniendo en apartados distintos cada una de las partes con todos sus detalles y, a medida que se presentaban nuevas Especies que guardaban relación con las ya descritas, las describía al lado suprimiendo todas las semejanzas y anotando únicamente sus diferencias»[79]. El conjunto de semejanzas queda como un fondo ignorado del que emerge la prominencia de las diferencias. Cuando se agrupan de forma natural aparecen líneas de separación. Más o menos acentuadas

[78] *Introduction à la Botanique,* pág. 289

[79] *Familles des Plantes,* pág. 158

según la amplitud de las diferencias, las divisiones imponen la jerarquía de las clases.

Así pues, sistema y método derivan de principios distintos, incluso opuestos. Pero, si bien el procedimiento difiere, el lenguaje es común y el resultado similar, ya que ambas técnicas permiten construir la misma jerarquía de cinco niveles. Tanto en un caso como en otro, una de las etapas comporta una opción arbitraria sobre la que descansa todo el edificio. De ahí surge una dificultad común a todas las clasificaciones, ya señalada por Buffon: «Este es el punto más delicado de la historia de las ciencias: saber distinguir bien lo que hay de real en un sujeto de lo que nosotros introducimos de arbitrario al considerarlo»[80]. Tanto para los sistemáticos como para los metodologistas, tanto para Ray, Tournefort o Linneo como para Magnol, Adanson o los Jussieu, la elección de una nueva clasificación se justifica con un solo argumento: menos arbitraria y más natural. Hallar el orden verdadero que existe en la naturaleza es el objetivo de la historia natural; y para ello hay que distinguir lo esencial de lo accidental.

Durante siglos, desde Aristóteles y a través de la escolástica, la unidad de un grupo viviente se ha fundado en su «esencia», que constituía la suma del «género» y de la «diferencia». En el siglo XVII se modifican el sentido y la función de lo que se llama esencia de los seres, pero la búsqueda de lo esencial está aún en la base de cualquier esfuerzo de análisis y clasificación. Lo que interesa en la comparación de las plantas son las diferencias esenciales y no los accidentes aleatorios, debidos a variables que escapan a las leyes de la naturaleza. «La estructura», dice Tournefort, «es el carácter que distingue esencialmente las plantas entre sí»[81]. Sin embargo, todo el mundo coincide en constatar la presencia de un grado considerable de arbitrariedad incluso en la elección del carácter. Según lo que se espere del mismo, éste puede manifestarse a todo lo largo de la comparación de las plantas, desde la «marca singular» de un órgano preciso al conjunto de notas extraídas de la planta entera. Según Linneo, el carácter puede ser «artificial, esencial o natural»[82]. Para esta-

---

[80] *De la manière d'étudier... ;* Oeuvres complètes, in-16, I, pág. 88

[81] *Éléments de Botanique,* pág. 1.

[82] *Philosophie Botanique,* 186, pág. 166.

blecer las separaciones entre las clases debe utilizarse únicamente «el carácter esencial mejor elegido»[83] y rechazar cualquier nota accidental: todo lo que dependa del lugar de implantación, de la temperatura, de la irrigación y de la exposición al sol o al viento; en suma, todo lo que puede variar en función de las condiciones ambientales. Lo esencial en una planta, por lo tanto, es la singularidad impuesta por la naturaleza, que escapa a toda intervención externa. Al oponerse a lo accidental, la naturaleza de lo esencial es necesariamente objetiva. No depende de la observación, sino de los orígenes remotos de la creación. El orden en el que se articulan las esencias de los seres es el que dicta la naturaleza, no la razón. Lo esencial de las plantas constituye de alguna forma la buena conciencia del naturalista. Le permite separar sus clases «sin escrúpulos», como aconseja Tournefort[84], buscando únicamente la eficacia. Para Linneo, lo que constituye lo esencial en una planta es lo que le viene impuesto por «la generación ininterrumpida de las especies»[85].

Si los sistemas y el método poseen cada uno su lógica interna, ésta no tiene ninguna relación con la realidad de la naturaleza. Se debe recurrir, por lo tanto, a un elemento exterior que no se base únicamente en la estructura visible de los seres, sino en la permanencia de esta estructura a través de las generaciones. El concepto de especie nace, a finales del siglo XVII, de la necesidad de los naturalistas de dar a sus clasificaciones un punto de apoyo basado en la realidad de la naturaleza. Lo que hace de la especie una categoría privilegiada es que no se basa únicamente en una cierta semejanza, por muy grande que sea, entre individuos, sino también en la sucesión de generaciones que producen siempre lo semejante. Dice John Ray: «La identidad específica del toro y de la vaca, del hombre y de la mujer, provienen ya del hecho de que nacen de los mismos padres, a menudo de la misma madre»[86]. Si se mantiene un orden en la estructura de los animales y de las plantas, es porque se transmite fielmente de progenitores a descendientes con el conjunto de propiedades. La forma específica de un ser vivo se prolonga en cierta medida en el líquido se-

[83] *Ibid., 258,* pág. 242.

[84] *Introduction à la Botanique,* pág. 297.

[85] *Philosophie Botanique, 259,* pág. 242.

[86] *Historia plantarum, I,* cap. XX, Londres, 1686, pág. 40.

minal, como constata Ray: «Una especie nunca nace del esperma de otra y recíprocamente». Hay que excluir asimismo de la especie todos los híbridos estériles, todos los «mulos» que producen ciertas uniones no conformes a la naturaleza. Así pues, para que la especie conserve un carácter universal, es preciso que la generación sea, en palabras de Buffon, «continua, perpetua e invariable, similar en una palabra a la de los otros animales»[87]. En estas condiciones, las operaciones de la naturaleza tanto en el mundo vivo como en el mundo inanimado se llevan a cabo con regularidad, obedeciendo a unas leyes de las que la especie no es más que una expresión.

La propiedad que tienen los seres vivos de engendrar semejantes y su corolario, el concepto de especie, constituyen, al fin y a la postre, la base de la historia natural del siglo XVII. De hecho, para posibilitar la clasificación del mundo vivo, la especie funciona a dos niveles. En primer lugar, al no basarse únicamente en una separación arbitraria de lo visible y poner en juego la regularidad de la naturaleza misma, la especie da un fundamento común y universalmente admitido a todas las clasificaciones de las que ella constituye la unidad básica. La especie no se convierte nunca en objeto de las discusiones que surgen, por ejemplo, alrededor del género. Justifica el esfuerzo que trata de instaurar un orden en la cadena de los seres, de separar la trama continua que forma el mundo vivo. En la medida en que «existen» especies, la ciencia de los seres no se fundamenta en las reflexiones del espíritu, sino sobre bases naturales. Por otra parte, la permanencia de la especie a través de las generaciones asegura que el mundo vivo tal como lo vemos hoy refleja perfectamente el que fue instaurado inicialmente. «Contamos con tantas especies», dice Linneo, «como formas creadas hubo en el principio»[88]. Para que la historia natural ocupe su lugar en el conjunto del conocimiento, no basta con que exista la posibilidad de instaurar un orden en el mundo vivo. Es necesario, además, que la clasificación establezca una relación entre el mundo vivo de hoy y su origen. El concepto de especie garantiza la permanencia de las formas vivas desde la creación. Dice Buffon:

---

[87] *Histoire naturelle des Animaux;* Oeuvres complètes, in-4, III, pág. 414

[88] *Philosophie Botanique*, 157, pág. 130

«Un individuo no es nada en el universo; cien individuos, mil, tampoco son nada. Las especies son los únicos seres de la naturaleza; seres eternos, tan antiguos, tan permanentes, como ella; seres que se pueden considerar como un todo independiente del mundo, un todo que ha sido contado como uno entre las obras de la creación y que, por consiguiente, forma una unidad en la naturaleza»[89]. En definitiva, las relaciones que pueden establecerse entre los seres se basan siempre en otro sistema lógico, sea la permanencia de las estructuras visibles con Tournefort y Linneo o, más tarde, la integración funcional de los organismos con Cuvier, y después su filiación evolutiva con Darwin.

## La preformación

Con el concepto de especie, la generación se convierte en una expresión de la regularidad de la naturaleza. Pero, para el siglo XVII, la generación sólo puede considerarse a través de la estructura visible de los seres vivos y de las leyes de la mecánica. A diferencia de la circulación de la sangre, los fenómenos de la generación no pueden analizarse mediante mediciones de volúmenes, de movimientos y de velocidad, ni describirse en términos de palancas, poleas o bombas. Cuando Harvey se interesa por la generación de los seres, no puede hacerlo mejor que su maestro Fabrizio de Acquapendente. Este hacía incubar huevos de gallina y abría uno cada día para examinar el estado del embrión. En la época del celo, Harvey sacrifica una de las ciervas del rey de Inglaterra cada día y la abre en canal para observar el contenido de la matriz. No ve otra cosa que una masa informe, una pequeña masa gelatinosa, una especie de «cicatriz» donde se dibujan progresivamente un corazón, unos vasos, unos intestinos, una cabeza y unas patas. Harvey tiene que limitarse a hacer analogías poco convincentes. La hembra ha sido fecundada por el macho del mismo modo que el hierro, una vez tocado por el imán, adquiere una virtud magnética[90]. La matriz se parece también al cerebro, ya que «una concibe el feto como el otro las ideas que nacen en él»[91]. Dado

[89] *De la Nature, revue;* Oeuvres complètes, in-4, III, pág. 414.

[90] *On the generation qf Animals,* 1651*; The Works of W. Harvey. On Parturition,* pág. 575

[91] *Ibid.,* pág. 577.

que Harvey sitúa su famoso *Omnia ex ovo* en el epígrafe de su *Tratado de la generación animal*, se le atribuye con frecuencia la paternidad de la idea de que todo ser vivo proviene a fin de cuentas de un huevo. Pero el *ovum* no es únicamente el huevo. Es toda sustancia ya algo organizada: carne en putrefacción, plantas podridas, excrementos; es también la ninfa o crisálida de los insectos; en suma, es todo lo que puede originar un ser vivo, sea cuadrúpedo, mosca, gusano o planta.

Para el siglo XVI, la generación espontánea era por lo menos tan fácil de explicar como la derivada de las simientes, ya que ponía directamente en juego la acción de fuerzas divinas sobre la materia. Para el siglo XVII, se trata de reemplazar las fuerzas ocultas por la ordenación de la materia y por las leyes del movimiento que deben dar cuenta de la formación de los seres vivos como lo hacen de la caída de los cuerpos o el movimiento de los astros. Para Descartes esto no representa ninguna dificultad especial. Al ser la materia la misma en todos los cuerpos del mundo, los seres no difieren de las cosas más que en la disposición de la materia. Muy poco debe hacer falta para animar esta materia y hacer surgir de ella un cuerpo vivo. Un poco de calor o presión, un simple frotamiento para activar las partes y hacerlas reaccionar entre sí.

«Ya que se necesitan tan pocas cosas para hacer un ser, no hay por qué sorprenderse de que tantos animales, tantos gusanos, tantos insectos, se formen espontáneamente ante nuestra mirada en cualquier materia en putrefacción»[92]. El calor y el movimiento deben actuar poco a poco, por partes. Ni en la carne ni en el huevo de los animales perfectos podría el pequeño ser surgir de repente y salir ya equipado como Minerva del cerebro de Júpiter. La materia se ordena progresivamente, órgano a órgano, con la regularidad de un reloj muy complejo. En los seres que engendran a sus semejantes, la mecánica está ya preparada por la ordenación de la materia en el esperma. Para hablar del desarrollo del embrión, Descartes utiliza términos parecidos a los que empleará más tarde Laplace para describir los movimientos del universo:

«Si se conociesen bien todas las partes del esperma de alguna especie animal en particular, por ejemplo del hombre, de ello solo podría dedu-

[92] *Primae Cogitationes; Oeuvres, Cerf, XI,* París, 1897-1913, pág. 506.

cirse, por razones ciertas y matemáticas, la forma y disposición de cada uno de sus miembros»[93].

La generación espontánea tolera mal el peso creciente de la observación. A medida que el ojo asistido por una lupa o un microscopio observa más de cerca los insectos, la complejidad de su estructura visible aumenta. Se descubre poco a poco toda una red de fibras, vasos y nervios entrelazados con precisión. «Una mosca», exclama Malebranche, «tiene tantas y quizá más partes orgánicas que un caballo o un buey. Un caballo sólo tiene un cristalino: en cambio se descubre hoy que en el ojo de las moscas existen varios miles»[94]. Las observaciones de Swammerdam y de Malpighi revelan la metamorfosis del gusano de seda, del grillo, del escarabajo y de la mariposa. Describen sus órganos sexuales, sus formas de acoplamiento. Todo esto concuerda mal con la formación de los gusanos u de las moscas por el calor de la fermentación en la carne. Ahora bien, la exclusión de la generación espontánea de los insectos en el siglo XVII es posible porque la experimentación necesaria sólo pone en juego el movimiento, el del aire y el de los seres vivos. Basta con depositar la carne en un frasco herméticamente cerrado para evitar que ésta se descomponga y que origine moscas. En cuanto a la idea que le llevó a realizar dicha experiencia, Francesco Redi, en su libro sobre la generación, la atribuye a la lectura de Homero. Si la putrefacción de las carnes es suficiente para engendrar insectos, afirma Redi[95], ¿por qué, en el canto XIX de *La Ilíada,* Aquiles teme tanto que el cuerpo de Patroclo se convierta en presa de las moscas? ¿Por qué le pide a Tetis que preserve el cuerpo de los insectos que pueden originar gusanos y corromper así las carnes del muerto? La experiencia muestra que los temores de Aquiles eran fundados. «Estos gusanos», dice Redi, «son todos engendrados por inseminación, y la materia putrefacta donde se les halla sólo sirve de emplazamiento, de nido donde los animales ponen sus huevos en la época de la generación y donde encuentran su alimento; en otras palabras, afirmo que

[93] *Formation de l'animal;* Oeuvres, XI, pág. 277.

[94] *Entretiens sur la Metaphysique, sur la Religion et sur la Mort, II,* París, 1711, págs. 14-15

[95] *Experimenta circa Generationem Insectorum; Opera, I,* Amsterdam 1688, págs. 30-31

nada se engendra de esta materia»[96]. Sucede lo mismo con los gusanos que viven en el intestino del hombre y los animales. Estos gusanos no nacen de las entrañas de sus huéspedes, sino de una simiente que, hallándose en el aire, el agua o los alimentos, es aspirada o tragada por los animales. Sucede lo mismo con los insectos que nacen en las plantas. No son los frutos, las raíces o los tumores de las plantas los que los engendran, sino insectos que vienen a poner sus huevos. A finales del siglo XVII, los gusanos, las moscas o las anguilas nacen de los gusanos, de las moscas o de las anguilas. Allí donde surge un ser vivo, hubo antes uno semejante para engendrarlo. En buena lógica, la generación espontánea tenía que desaparecer. Pero se refugia casi inmediatamente en ese mundo invisible y un tanto grotesco de los animálculos, de pronto descubiertos con la ayuda del microscopio en el agua de los canales, en infusiones de plantas, en la saliva. Para eliminarla definitivamente no bastará con realizar nuevas experiencias. El concepto de especie todavía tiene que afianzarse, tienen que precisarse sus límites y garantizarse su permanencia.

En lo que respecta al engendramiento, el secreto se esconde en el líquido seminal. Es allí donde hay que sustituir las fuerzas ocultas por forma y movimiento. Porque los errores de la facultad formadora, los antojos de la imaginación materna, la influencia de la alimentación o los sueños en la formación del niño, en suma, todas las fantasías, todas las irregularidades que obstaculizan el curso normal de las cosas, se llevan mal con la armonía universal y con las leyes de la naturaleza. Pero el único aspecto de la generación que puede abordar el siglo XVII con sus métodos de análisis, el único accesible a sus técnicas de observación y al poder de resolución que le brinda el microscopio, es el contenido del líquido seminal. Sólo en ese ámbito está preparada esta época para sustituir principios y virtudes por formas y partículas. Una de las preguntas más simples que pueden plantearse entonces a propósito de la generación es: ¿qué contiene el líquido seminal de cada sexo? Más concretamente: ¿a qué se debe que unos animales pongan huevos y otros produzcan seres vivos? Tras mucho examinar, seccionar, hurgar los cuerpos, se acaba por descubrir en los «testículos» de las hembras vivíparas unas pequeñas masas llenas de un líquido similar a la clara de huevo y que amarillean

---

[96] *Ibid.*, págs. 17-18

después del acoplamiento. Régnier de Graaf llega incluso a establecer una correlación entre el número de estos abultamientos y el de los embriones que aparecen en las trompas de la matriz. Hasta el siglo XIX, en el que los embriólogos demostrarán que los abultamientos observados por de Graaf son en realidad folículos que rodean los huevos propiamente dichos, desempeñarán el papel de huevos. Así pues, a finales del siglo XVII todas las hembras poseen huevos. «No dudo ya», dice Stenon, «que los testículos de la mujer son ovarios»[97]. Con independencia de que los recién nacidos salgan de un huevo, como hace un pollito, o del vientre de su madre, como hace una ternera, el proceso es el mismo. Cabra, cordero, vaca, sean cuales sean los animales objeto de disección, siempre se halla la misma anatomía. Dice de Graaf: «La generación se hace del mismo modo en las mujeres, ya que tienen huevos en los testículos y trompas unidas a la matriz como los brutos»[98]. Pese a las protestas de las beldades indignadas de que se las compare con las gallinas, se discute sin descanso para dilucidar si pueden formarse huevos sin coito y si las vírgenes o las mujeres frígidas también los tienen. Se debate si la mujer expulsa cada mes un huevo con sus menstruaciones o si, por el contrario, el huevo sólo se desprende «bajo el aguijón del placer».

En lo referente al líquido seminal masculino, el microscopio descubre, como antes en el agua de los canales o en la maceración de heno, innumerables criaturas, pequeños gusanos que viven, se mueven y nadan en todos los sentidos. De todo este mundo revelado de pronto, casi por azar, por el microscopio, los animálculos del líquido seminal masculino son los únicos que encuentran acomodo y función. Con los animálculos del agua de los canales no se sabe qué hacer, ni dónde situarlos, ni si se les debe considerar como objeto de maravilla o de escándalo. Los animálculos del líquido seminal masculino, por el contrario, son en cierta medida lo que la razón buscaba. Para que el macho pueda desempeñar su papel, para liberar al líquido seminal de principios y virtudes, era necesario encontrar partículas y cuerpos organizados. De hecho, el hallazgo supera las previsiones. «No existen tantos hombres en la superficie del

[97] *Elementorum myologiae specimen*, Florencia, 1667, pág. 117

[98] *Traité des parties de femmes qui servent à la génération*, Varsovia, 1701, pref., págs. II-III.

globo como animálculos en la lechada de un solo macho», dice Leeuwenhoek[99], quien se cuida mucho de precisar que sus exámenes no han sido hechos a expensas de su propia descendencia.

Tenemos, pues, huevos en las hembras y animálculos en los machos. Esto debe ser suficiente para producir la complejidad de un animal. Si se niega una facultad formadora, si se rechaza la intervención de cualquier fuerza misteriosa, si se quiere organizar las partículas de los líquidos seminales para transformarlas en animal con las solas leyes del movimiento, el problema no tiene solución. «No es posible», dice Malebranche, «que la unión de los dos sexos forme una obra tan admirable como es el cuerpo de un animal. Se puede admitir que las leyes generales de la comunicación del movimiento basten para desarrollar y hacer crecer las partes de los cuerpos organizados, pero es inadmisible que alguna vez puedan formar una máquina tan completa.»[100] El aspecto que hay que explicar de la generación, en una época en la que los seres vivos se determinan por su sola estructura visible, es el mantenimiento a lo largo del tiempo de esta estructura primaria. Esta no puede desaparecer, sino que debe persistir a través de los líquidos seminales, generación tras generación. Para la continuidad de la forma es necesario que el líquido seminal contenga el «germen» del pequeño ser que debe venir, que éste esté «preformado». El germen representa ya la estructura visible del futuro niño, similar a la de los padres. Es el proyecto del futuro cuerpo vivo, y no en forma potencial dentro de alguna parte activa del líquido seminal a partir de la cual se organizaría progresivamente el cuerpo del pequeño ser como se ejecuta un plan, sino ya materializado como una miniatura del futuro organismo, como un modelo reducido con todas las partes, todas las piezas y todos los detalles en su lugar. En el germen está ya realizado el cuerpo completo, aunque inerte, del ser por venir. La fecundación no hace sino activarlo y promover su crecimiento. Sólo entonces el germen puede desarrollarse, prolongarse en todas las direcciones y adquirir su tamaño definitivo, al estilo de esas flores japonesas que se venden secas, pero que al ponerse en agua se abren, se despliegan y adquieren su confi-

---

[99] *Carta a Grew del 25 de abril de 1679; Arcana Naturae,* Leyden, Boutesteyn, 3.ª ed., 1966, 2ªparte, pág. II

[100] *Entretiens,* II, pág. 13.

guración definitiva. Con los animales sucede lo mismo que con las plantas: en muchas semillas se observa en efecto la miniatura de la futura planta con todos sus detalles, el esbozo de los tallos y de las ramas, las hojas replegadas. No es necesario organizar la materia a partir de la fecundación y el desarrollo embrionario. Todo ser vivo parte de algo que ya se le asemeja. Tanto en los animales como en las plantas, las palancas, las poleas y los resortes bastan para asegurar el desarrollo del germen, ya que se trata únicamente de una cuestión de crecimiento. Cada elemento del germen se extiende gradualmente en todas direcciones para perpetuar en grande lo que ya era en pequeño.

La principal pregunta que se plantea en relación a la generación es entonces la siguiente: ¿cuál de las dos simientes, macho o hembra, contiene el germen? Existen, lógicamente, dos escuelas. En primer lugar, se puede situar el germen en el huevo. La fecundidad descansa entonces por completo en la hembra. En ella yace, inerte, la miniatura del futuro ser vivo, esperando en el ovario la hora de la fecundación. La función del macho es bien modesta en este caso, pues se limita a la activación del germen, bajo una forma u otra, gracias al líquido espermático. De hecho, hay cantidad de argumentos para atribuir al huevo el principal papel en la generación. Están las experiencias de Malpighi y otros con el huevo de gallina, en el que distinguen, al margen de cualquier incubación, las formas del futuro polluelo. El gallo carece de órgano penetrador; se contenta con rociar los huevos para activarlos. Lo mismo acontece en los peces, en los que el macho no hace más que rociar los huevos expulsados por la hembra. Este es también el caso de la rana, cuyos amores son bien singulares, ya que el macho se sitúa detrás de la hembra y la enlaza con sus brazos. Permanecen así abrazados durante semanas enteras, y nadie sabe decir cómo cumple con su papel el macho. Swammerdam pretende que el proceso en las ranas es el mismo que en los peces, y que el macho baña los huevos expulsados por la hembra con su líquido seminal. Sin embargo, parece dudoso que la fecundación se realice fuera del cuerpo de la hembra y, de todos modos, resulta difícil imaginar que el germen no esté situado en el huevo. En lo que respecta al hombre, todo el mundo sabe que ese líquido que vierte con tanto placer no penetra en la matriz de la mujer, sino que se derrama fuera de ella inmediatamente después de liberado. Se sabe de muchas jóvenes que han quedado encintas aun sin

haber dejado penetrar en ellas el líquido del hombre. Únicamente lo que hay en este líquido de más «espirituoso» es lo que se infiltra en la matriz, sube a los ovarios y penetra en el huevo por uno de los poros reservados a tal uso. O bien esta parte «sutil» del líquido masculino se introduce en los vasos sanguíneos de la mujer, donde se mezcla con la sangre y desencadena «los daños que atormentan a las mujeres», hasta que llega al ovario, donde el huevo es fecundado luego de que la sangre misma de la mujer haya quedado fecundada en su conjunto. En cuanto al innegable parecido de los hijos con el padre, es evidente que la fuerza del macho concentrada en el espíritu del líquido seminal juega su papel en la organización del feto. La disposición del embrión depende en efecto de varios factores: sin duda, de la forma del germen o de la actividad y la vida de la madre durante la gestación, pero también de la fuerza con la que las partes del embrión han sido activadas al ser impregnadas por el espíritu seminal del padre.

También puede sostenerse la tesis inversa y situar el germen en los animálculos que nadan en el líquido seminal del macho. En este caso la fecundidad se atribuye por entero al macho, «lo que es más conforme a la dignidad de este último». ¿Por qué inventar en los huevos las criaturas necesarias para la generación, si las vemos agitarse en el líquido seminal del macho? La generación de los seres vivos es simplemente el desarrollo de estos animálculos, cada uno de los cuales, dice Hartsoeker, «encierra y esconde en miniatura bajo una piel tierna y delicada un animal macho o hembra de la misma especie»[101]. La función de la mujer se limita a proporcionar el nido y el alimento necesario para el desarrollo de los animálculos. Estos penetran en la matriz, ascienden hasta el ovario y buscan un lugar conveniente para establecerse. Sólo uno logra penetrar en el huevo, el cual «tiene una sola entrada para dejar pasar un gusano… y tan pronto como ha entrado uno, esta abertura se cierra e impide el paso de cualquier otro gusano»[102]. Una vez instalado en su huevo, el pequeño ser crece y se desarrolla insensiblemente hasta alcanzar el tamaño y la madurez compatibles con el nacimiento. A base de examinar los animálculos se acaba por distinguir dos clases. «Los Animálculos se diferencian se-

---

[101] *Hartsoeker, Essay de dioptrique*, cap. X, 89, París, 1694, pág. 229

[102] *Ibid.*, pág. 228

gún el sexo», dice Leeuwenhoek, «y se distinguen en Machos y Hembras»[103]. Muchos intentan descubrir en su microscopio la forma de cada animal dentro del animálculo correspondiente. Pero todo es en vano; pese a los esfuerzos, no se distingue ninguna forma oculta tras la piel que envuelve el animálculo. Sólo se le puede imaginar bajo el aspecto, por ejemplo, de un homúnculo, un feto raquítico con las piernas dobladas y la cabeza hundida entre los brazos, acurrucado en su gusanito[104]. Hay que resignarse. El germen se asemeja a un pez o un gusano, lo que se ajusta a los usos de la naturaleza. ¿Quién reconocería al abejorro en el gusano que lo ha originado?

¿Quién creería que las maravillosas mariposas de alas luminosas fueron antes esas horribles orugas que se arrastran penosamente? No hay duda, concluye Geoffroy, «el hombre comienza siendo Gusano»[105].

La preformación de los gérmenes representa en el siglo XVII el único medio de asegurar la permanencia de las estructuras visibles por filiación, pero, al no recurrir a una estructura secundaria oculta, de hecho lo único que hace es trasladar el problema. Pues la verdadera generación se convierte entonces en la formación del germen en el líquido seminal. Es necesario explicar su procedencia y cómo se organiza. La dificultad sigue siendo la misma: si no se quiere recurrir a algún poder misterioso, a alguna virtud creadora, hay que quedarse con las leyes del movimiento, tan insuficientes para organizar un germen como un embrión. Sólo queda una solución, y es considerar que los gérmenes de todos los organismos —pasados, presentes o futuros— han existido siempre; que fueron formados en el momento de la creación, y sólo esperan a que les llegue la hora de activarse por la fecundación. Es la teoría de la preexistencia de los gérmenes. Dado que estos gérmenes tienen que ser infinitamente pequeños, sería ilusorio pretender verlos, ni siquiera con microscopio. Como dice Malebranche: «No hay que dejar que el espíritu se fíe de la vista, ya que la mirada del espíritu alcanza más lejos que la vista del cuerpo»[106].

---

[103] *Carta a Leibniz, Epistola physiologicae, Delft,* 1719, pág. 294

[104] *Essay de dioptrique,* pág. 230.

[105] *Tesis de medicina, Matière médicale*, I, pág. 95.

[106] *Recherche de la Verité, I,* París, 1700, pág. 48.

Hay dos maneras de considerar la preexistencia, según la localización que se asigne a los gérmenes en espera de ser activados. En primer lugar, se puede situar el germen fuera de los seres vivos coetáneos y repartirlos, como hace Claude Perrault, por toda la naturaleza. Los gérmenes son demasiado pequeños para reparar en ellos, pero los hay en el agua, en los alimentos que ingerimos o en el aire que respiramos.

Así, según Perrault: «La generación no puede dejar de producirse, porque los pequeños cuerpos, al estar en cantidad casi infinita de géneros y de especies por todas partes, es muy difícil que no se encuentren en la sustancia homogénea del grano o que no lleguen hasta ella»[107]. Los gérmenes eligen los seres de la misma especie para instalarse y formar la minúscula criatura que espera la fecundación para crecer.

La otra alternativa es situar los gérmenes en el interior de los seres vivos. En ese caso, la minúscula criatura preformada debe contener los gérmenes de sus futuros hijos, los cuales contienen a su vez los gérmenes de sus hijos, y así sucesivamente. Así, para Malebranche, en una simple pepita de manzana hay «manzanos, manzanas y semillas de manzanos para una infinidad o casi una infinidad de siglos, en la proporción de un manzano perfecto a un manzano en la semilla»[108]. Sucede lo mismo con los animales. Los gérmenes de todos los hombres posibles en todos los tiempos datan de la Creación, pero pueden, según la imagen de Swammerdam[109], estar contenidos en las costillas de Eva o de Adán. Esto dependerá de la localización que se asigne a los gérmenes, en el huevo o en el animálculo. Si el germen reside en el huevo, entonces «las hembras de los primeros animales fueron creadas con todos los de la misma especie que deben engendrar a lo largo de todos los tiempos»[110]. Pero si, por el contrario, se quiere ver el germen en el animálculo, entonces «los primeros machos fueron creados junto con todos los de la misma especie que han engendrado y que engendrarán hasta el fin de los siglos»[111]. En cual-

[107] *De la méchanique des Animaux. Oeuvres diverses de physique et de méchanique,* Leiden, 1721, pág. 485

[108] *Recherche de la Verité, I,* págs. 47-48.

[109] *Histoire générale des Insectes,* Utrecht, 1682, pág. 48.

[110] *Malebranche, Recherche de la verité,* I, pág. 48.

[111] *Hartsoeker, Essay de dioptrique,* pág. 231.

quier caso, los gérmenes masculino y femenino tienen que ser distintos, pues uno de los dos debe incluir los gérmenes de todos sus descendientes encajados como muñecas rusas. De una a otra generación, el tamaño de las muñecas disminuye en la proporción del organismo al huevo correspondiente. El feto que debe nacer dentro de mil años está tan bien formado como el que debe nacer dentro de nueve meses; sólo difiere en tamaño. Pero su pequeñez, que lo hace invisible, no lo sustrae a las leyes de la naturaleza. La imaginación tendría un buen motivo para alarmarse si no se supiera que la materia es divisible hasta el infinito. Todo ello, sin embargo, no basta para proteger el desarrollo del feto contra los antojos de la imaginación maternal. Malebranche refiere este caso: «No hace aún un año que una mujer que había observado con demasiado detenimiento el cuadro de san Pío, cuya canonización se conmemoraba, dio a luz un niño que tenía un parecido perfecto con la representación de este santo. Su cara era tan de anciano como pueda aparentar un niño sin barba. Tenía los brazos cruzados sobre el pecho, sus ojos mirando al Cielo… Es algo que todo París ha podido ver tan bien como yo, porque se le ha conservado durante largo tiempo en alcohol»[112].

Limitado al conocimiento de la estructura visible de los seres vivos y a las leyes de la mecánica, el siglo XVII acaba por relegar la verdadera generación, la que organiza la materia en un ser, al dominio de las causas primeras, de las que rehúsa ocuparse. La ciencia sólo se interesa por el universo tal como existe hoy; es decir, por los productos de la creación y por las leyes que expresan la regularidad de sus movimientos. Pero la generación, si bien aún no puede ser una reproducción, una reformación del niño a imagen de sus padres, ha cambiado de papel y de estatuto. Ya no se trata de una creación aislada, independiente de las demás, la realización inmediata de una intención sin relación con las intenciones semejantes. La producción de un ser se inserta en la culminación progresiva, al hilo de los tiempos, de un mismo proyecto a largo plazo. Para que lo semejante produzca siempre lo semejante y se mantenga la especie por filiación, todos los gérmenes de los individuos que constituyen la especie deben haber sido creados conjuntamente, de una vez por todas, según el mismo modelo. Al ser inimaginable la reconstrucción, para cada naci-

[112] *Recherche de la verité*, libros II, VII, tomo I, pág. 200.

miento, de la estructura visible bajo el efecto de una estructura de orden superior, no se ve otra solución que derivar las generaciones sucesivas de una creación simultánea. Tanto lo que será el padre como lo que será el hijo o el nieto tienen que haberse formado conjuntamente. La idea de esta preexistencia concuerda perfectamente con el concepto de especie. Si el germen preformado en el líquido seminal del progenitor ha sido formado en el momento de la creación con todos los de su especie, ya no hay lugar para intervenciones externas en el curso de la generación, para irregularidades debidas a antojos de los padres o pecados contra natura. Las generaciones sólo pueden sucederse idénticas a sí mismas, ya que proceden siempre de la activación de productos idénticos extraídos de una misma reserva constituida como base. La especie se convierte en esa colección de gérmenes, en esa reserva de ejemplares fabricados según el mismo modelo.

La preformación y la preexistencia sitúan así la generación de los seres en el mismo plano que los otros fenómenos de la naturaleza. Los seres, como las cosas, «sólo pueden comenzar», dice Leibniz, «por creación y acabar por aniquilación»[113]. El universo ha salido por entero de las manos de Dios, provisto ya de todas sus piezas. Todo ha surgido de la nada por voluntad suya. Cada astro, cada piedra, cada ser que aparezca en el curso de los tiempos ha sido formado por una creación definitiva y acabada. Desde el impulso inicial, el sistema de la naturaleza funciona con la regularidad que expresan las leyes de la naturaleza, sin otra intervención divina. Los astros giran, las piedras caen y los seres nacen.

Durante todo el siglo XVIII, y mientras los seres vivos se conciben como combinaciones de elementos visibles, la preformación y la preexistencia constituyen la única solución posible al problema de la generación. Son la única respuesta al argumento de Fontenelle: «¿Decís que las Bestias son Máquinas y Relojes a la vez? Pero poned una Máquina Perro y una Máquina Perra una al lado de otra, y puede resultar una tercera Máquina pequeña, mientras que dos Relojes estarán toda una vida uno al lado del otro sin producir jamás un tercer Reloj»[114]. Así pues, la producción de un ser es el resultado de un proyecto en el que ni la concepción ni

[113] *Essais de Théodicée, I,* Lausana, 1760, pág. 585.

[114] *Lettres galantes;* Oeuvres, I, págs. 322-323.

la realización pueden separarse de la creación del mundo. Es el orden visible de los seres el que se mantiene por filiación. La continuidad de las formas vivientes en la especie y en el tiempo exige la continuidad de esas formas a través de los procesos mismos de la generación. ¿Cómo podría nacer una gallina de un huevo, si no fuese por la presencia en el huevo de lo que caracteriza a una gallina, es decir, una cierta estructura visible? En lo que respecta a la activación del germen y su crecimiento, «¿no sería mucho más justo», dice Haller, «preguntarnos por qué mecanismo se efectúa que preguntarnos por qué la resorción interna de la simiente del Macho le hace crecer la barba?»[115].

No obstante, durante el siglo XVIII se realizan muchas observaciones que revelan la minuciosidad, la paciencia y la constancia de los naturalistas. Muchas experiencias también dan fe de su ingeniosidad y su habilidad. Esta experimentación procede necesariamente de los principios y las técnicas familiares a la mecánica, y se limita a los únicos aspectos que, en la producción de los seres, son accesibles a sus métodos. Es cuestión, por ejemplo, de amputar un miembro y hasta de cortar un cuerpo en pedazos para observar el efecto producido. El aspecto de la generación más accesible al análisis mecanicista es la propia simiente. Se puede impedir que el líquido espermático llegue a su destino natural, o recoger por separado este líquido y los huevos para mezclarlos después. Este líquido puede diluirse o calentarse para ver si conserva siempre su actividad. La generación se hace así accesible a la experimentación —al menos algunos fenómenos— aunque ésta se reduce aún a tratamientos muy simples. Pero la necesidad de la preformación es tan fuerte, tan inconcebible es la posibilidad de otra solución, que cualquier resultado se interpreta como apoyo de la idea del germen preformado.

La disputa por atribuir el papel principal en la generación al huevo o al animálculo se resuelve pronto en favor del huevo, gracias al descubrimiento de la partenogénesis. Siguiendo el consejo de Réaumur, Charles Bonnet se pone a estudiar la multiplicación de los pulgones. Para asombro de todos, ve que uno solo de estos organismos se basta y se sobra para asegurar su descendencia. «Coged un pequeño cuando nace», aconseja Bonnet, «y encerradlo en seguida en la mayor soledad; para mejor

[115] *Citado por Bonnet, Considerations sur les Corps organisés;* Oeuvres, VI, pág. 443.

asegurar su virginidad, extremad la precaución hasta el extremo, convertiros para él en un Argus más vigilante que el de la fábula. Cuando el pequeño solitario haya crecido un poco empezará a dar a luz, y al cabo de algunos días le encontraréis en medio de una numerosa familia.»[116] Sin ninguna duda, el pulgón «merecería llamarse pulgona». Ahora bien, si existe un organismo capaz de multiplicarse «sin tener trato con individuo alguno de su especie»[117], no se ve cómo puede el germen localizarse en otra parte que no sea el huevo. También la anatomía respalda el sistema de los huevos. Para Haller y para Charles Bonnet, la membrana que tapiza interiormente la yema del huevo es continuación de la que reviste el intestino del embrión de pollo. La yema del huevo es, pues, una dependencia del embrión. Pero «dado que la yema existe incluso en los huevos no fecundados, se deduce necesariamente que el germen preexiste a la fecundación»[118]. Esta consecuencia salta a la vista: el pollo no debe su origen al líquido que proporciona el gallo; estaba ya «dibujado en pequeño» en el huevo antes de la fecundación.

En lo que respecta al papel de los gusanos espermáticos en la generación, éste es muy dudoso. Para Buffon, estos gusanos poseen una especie de vida animal, aunque no propiamente animal. La animalidad de los animálculos es tema de discusiones interminables. Aun cuando posean animalidad, los gusanos del líquido seminal masculino no se diferencian en nada de los que nacen y viven en el agua de los canales. Hay quienes los encuentran en todas partes, no sólo en el líquido espermático, sino también en las hembras —en las perras en celo, por ejemplo— en la carne cruda, en la gelatina de ternera y hasta en los excrementos. Lejos de ser el principio fecundante del macho, la función de los animálculos bien podría limitarse a homogeneizar el líquido espermático o favorecer la atracción de las simientes. Quizá sólo sirvan para el «placer venéreo».

La función del líquido espermático, y de los animálculos que contiene, puede estudiarse en función de una representación mecanicista simple. El problema se analiza en términos de materia y de fuerza. Por medios físicos se puede impedir la transferencia de materia, pero no la de

---

[116] *Contemplation de la Nature, VIII, 8;* Oeuvres, VIII, pág. 130

[117] *Insectologie; Oeuvres, I*, pág. 230.

[118] *Contemplation de la Nature*, Oeuvres, VIII, pág. 71

fuerza. Los organismos ovíparos son los más adecuados para tales ensayos, ya que de ellos pueden obtenerse huevos fecundados y no fecundados, en particular la rana, cuyo macho se sitúa detrás de la hembra durante la fecundación y la abraza durante días enteros. La fiel colaboradora de Réaumur se encarga de observar una de tales parejas sin quitarle la vista de encima durante toda la operación. «Tal como le había pedido», cuenta Réaumur, «dirigió su mirada hacia la parte posterior del macho y se quedó observando. Apenas acababa de hacerlo cuando vio salir de allí un chorro que no ha sabido comparar con otra cosa que una bocanada de humo de pipa»[119]) Pero nada asegura que esa bocanada de humo desempeñe papel alguno en la fecundación de los huevos que la hembra libera por paquetes durante este tiempo. Si existe una verdadera transferencia de materia del macho a los huevos, si ese chorro corresponde a una emisión de líquido seminal, debe ser posible impedir que este líquido alcance los huevos, que en tal caso quedarían estériles. Réaumur piensa en colocar «unos calzones de vejiga y unos calzones bien cerrados que tapen especialmente la parte posterior»[120] a una rana macho antes del acoplamiento. Pero la fecundación no se ve obstaculizada, ya que las ranas se quitan los calzones con sus patas, y de los huevos siguen naciendo renacuajos. Spallanzani, más hábil, logra fabricar unos calzones que permanecen en su sitio. «Los machos así vestidos se acoplaron, pero las consecuencias de este acoplamiento fueron las previstas: ninguno de los huevos llegó a eclosionar, ya que ninguno de ellos pudo ser humectado por el líquido espermático, del que observé gotitas bien visibles en los calzones»[121].

Así pues, este material ofrece la posibilidad de obtener cada una de las simientes por separado fuera del cuerpo del animal. De ahí la idea de intentar la fecundación mezclando las dos simientes en un frasco con objeto de «dar la vida artificialmente a esta especie animal», dice Spallanzani, «imitando los medios que utiliza la naturaleza para multiplicar los Anfibios»[122]. Algunos días después de haber sido impregnados con la

---

[119] *Mémoire sur les Grenouilles; Morceaux choisis,* París, 1939, pág. 250

[120] *Ibid.,* pág. 247

[121] *Expériences pour servir à l'histoire de la generation, XIII,* Ginebra, 1785, pág. 13

[122] *Ibid., CXIX,* págs. 128-129

lechada del macho, los huevos eclosionan y surgen renacuajos que empiezan a nadar. Este procedimiento permite realizar la fecundación artificial en los animales más diversos: sapos, salamandras, gusanos de seda, incluso una perra en celo a quien se inyecta en la matriz, con una jeringa, el líquido espermático extraído de un perro.

La fecundación artificial proporciona la herramienta necesaria para cualquier análisis experimental: una actividad observable y mensurable.

Permite investigar si cualquiera de las simientes, sometida previamente a diversos tratamientos, puede aún interpretar su papel en la fecundación. Spallanzani se encuentra así en condiciones de analizar el esperma masculino para decidir si su actividad debe atribuirse a alguna fuerza del líquido seminal o a los propios animálculos. Diluida en un litro de agua, una gota de líquido espermático de rana conserva su actividad, lo cual no resulta sorprendente visto el gran número de animálculos. Colocados sobre el líquido espermático sin tocarlo, los huevos no quedan fecundados: el líquido actúa por contacto, lo que excluye todo «vapor espermático». Si se matan los animálculos por medio del calor, por ejemplo, el líquido seminal se muestra todavía capaz de fecundar los huevos: el agente activo del líquido seminal masculino no reside, pues, en los animálculos, sino en «una fuerza que estimula el pequeño corazón de los Renacuajos»[123], Sólo la última experiencia de Spallanzani da un resultado falso, que no será rectificado hasta medio siglo después. Para Spallanzani, dicha experiencia confirma la presencia del germen preformado en el huevo, una nueva prueba de que «las pequeñas máquinas fetales pertenecen originariamente a las hembras y el macho sólo proporciona el líquido que determina su movimiento»[124].

Incluso la evidencia de la observación más directa es rechazada. En efecto, el examen del desarrollo de un embrión en un huevo depende de los medios técnicos del siglo XVIII. Lo que se puede buscar se relaciona exclusivamente con la forma y el movimiento, ya que se trata de distinguir entre el crecimiento de un germen preformado y la elaboración progresiva de lo que llegará a ser la estructura visible por una «epigénesis». Observando el desarrollo del pollo al microscopio, Caspar Frederic

---

[123] *Ibid., CLXIX,* pág. 201.

[124] *Ibid., CLII,* pág. 184.

Wolff distingue membranas superpuestas, primero simples, luego plegadas, que forman abultamientos, pequeños canales y tubos de donde surgen esbozos de órganos: el sistema nervioso, luego vasos, un tubo digestivo, etc. La estructura primaria de un ser vivo no está, por lo tanto, preformada en el huevo, sino que se organiza poco a poco mediante plegamientos, abultamientos, hinchazones, a través de una secuencia de operaciones mecánicas separadas en el tiempo y en el espacio. Es exactamente la conclusión que extraerá Von Baer de observaciones similares medio siglo más tarde. Pero si para el siglo XIX el libro de Wolff, *Theoria generationis*, será el origen de la embriología experimental, para el siglo XVIII permanece casi totalmente ignorado. No existe un marco en el que situar la epigénesis, ni solución para el problema de la generación de los seres vivos fuera de la preformación.

## La herencia

A pesar de la imposibilidad de abandonar las ideas de preexistencia y preformación, el siglo XVIII está en condiciones de demostrar su insuficiencia. Basta con un simple cálculo. Un germen, estima Buffon[125], es más de mil millones de veces más pequeño que un hombre: si la talla del hombre sirve de unidad, la de un germen se expresa por la fracción 1 / 1 000 000 000, es decir, por «un número de diez cifras», la del germen de segunda generación «por un número de diecinueve cifras», y la del germen de sexta generación «por un número de cincuenta y cinco cifras». Por comparación con la dimensión de la esfera del universo «desde el Sol hasta Saturno», suponiendo que el Sol es un millón de veces mayor que la Tierra y está separado de Saturno por mil diámetros solares, el tamaño del átomo más pequeño que es posible observar al microscopio se expresa por un número de cincuenta y cuatro cifras. ¡El germen de la sexta generación debería ser entonces más pequeño que el más pequeño de los átomos posibles! Absurdo, concluye Buffon.

Existe además el fenómeno de la regeneración, el poder que poseen ciertos animales de reconstruir un cuerpo entero a partir de un trozo. Así, el gusano acuático que estudia Bonnet o la hidra que observa Trembley.

[125] *Histoire naturelle des Animaux;* Oeuvres complètes, in-16, III, págs. 231-232.

Del mismo modo que le crecen las ramas a un árbol, a este «pólipo de agua dulce con brazos en forma de cuernos» le brotan pólipos jóvenes que se desarrollan y se desprenden del tronco paterno. Se puede cortar un pólipo en todos los sentidos, reducirlo a pedazos, trocearlo de cualquier manera: en dos o tres semanas, cada uno de los fragmentos produce un nuevo pólipo perfecto del que brotan pequeños pólipos. También las patas de los cangrejos se regeneran después de cortadas, así como los miembros de las salamandras o la cabeza de los caracoles de tierra. Se corte como se corte una pata de un cangrejo, a la altura que sea, siempre vuelve a crecer justo lo que falta. ¿Cómo conciliar todo esto con la preformación? ¿Debería recurrir el organismo amputado a uno de sus descendientes en potencia para pedirle prestado el trozo que le falta? Habría entonces que suponer, como dice Réaumur, «que no existe un solo punto de la pata del cangrejo que no tenga un huevo que encierre otra pata; o lo que es aún más sorprendente, una parte de la pata similar a la que existe desde el lugar en el que está situado este huevo hasta el final de la pata»[126]. Mejor aún, una vez que la pata ha crecido se la puede cortar nuevamente: vuelve a formarse otra. Habría que admitir que, como la primera, la nueva pata está llena de una infinidad de huevos destinados a renovar con precisión los fragmentos de pata que eventualmente podrían amputarse. Finalmente, existe el fenómeno de la herencia. Hasta entonces los parecidos familiares no habían contrariado mucho a los partidarios de la preformación. El hecho de que un niño exhiba rasgos de ambos padres siempre podía explicarse por alguna fuerza activadora o nutritiva. Lo que empieza a llamar la atención es la regularidad de las semejanzas. Si un hombre negro se casa con una mujer blanca, el resultado será siempre una mezcla de colores. Los hijos nacen siempre de color oliváceo, y siempre presentan rasgos provenientes del padre y de la madre: la talla, la cara y muchas características particulares, tanto físicas como morales. Lo mismo acontece con los animales: cuando el acoplamiento del asno y la yegua da fruto, éste no es nunca asno ni caballo, sino siempre una mezcla de ambos. ¿Cómo conciliar la preexistencia y la preformación con los imprevistos del acoplamiento? Dice Maupertuis: «El pequeño asno ya formado en el huevo de la yegua, ¿adquiriría orejas de asno porque un

126 *Mémoires Acad. Sc.,* Paris, 1712, pág. 235.

asno hubiese puesto en movimiento las partes del huevo?»[127]. Ridículo, concluye Maupertuis.

Pero si en el siglo XVIII los hechos de la herencia adquieren una nueva importancia, todavía no pueden pasar de objetos de observación, no de experiencia, al menos en los animales. Mientras los seres se manifiesten como combinaciones de elementos visibles, sólo cabe esperar la reordenación de estos elementos en las hibridaciones entre animales que difieren en una amplia gama de caracteres. Aunque el concepto de especie ha eliminado cualquier posibilidad de niños con cara de perro o corderos con cola de pescado, el mundo viviente es continuo. Forma una trama sin discontinuidades en la que todo es gradual y matizado. El límite impuesto por la naturaleza a los amores entre las bestias sigue siendo muy impreciso. Se puede intentar verificar los rumores que todavía circulan sobre los productos de uniones ilegítimas entre animales de especies bastante próximas, como los «jumartes», esos extraños animales supuestamente producidos por acoplamientos entre toro y yegua, entre vaca y asno o entre toro y asna; o incluso la unión entre perro y gata, o entre gallina y pato. Charles Bonnet sugiere a Spallanzani que ponga «un voluptuoso perro de aguas en compañía de conejas»[128]. Réaumur junta en un guardarropa una gallina y un conejo, «el cual se comportaba con la gallina como lo hubiese hecho con una coneja, y la gallina le permitía todo lo que le hubiese podido permitir a un gallo»[129]. Pese a las caricias del «ardiente conejo», pese a la «fuerte inclinación que estos dos animales tan poco aparejables sentían el uno por el otro», los huevos que pone la gallina resultan ser estériles, con gran pesar de Réaumur. Todos estos reveses refuerzan la idea de que es sobre la filiación sobre lo que debe fundamentarse la noción de especie.

Ante el fracaso de su experiencia, Réaumur[130] limita sus ambiciones al acoplamiento de animales pertenecientes a la misma especie, pero que difieran en ciertos detalles fácilmente observables. Se hace con dos tipos

---

[127] *Vénus Physique;* Oeuvres, II, Lyon, 1768, pág. 70.

[128] *Oeuvres, XII;* pág. 382

[129] *Art de faire éclore les Poulets, II,* París, 2.ª ed, 1751, pág. 340

[130] *Art de faire éclore les Poulets, II,* París, 2.ª ed, 1751, págs. 366-367.

de gallinas: unas que «difieren de las demás en que tienen una parte de más, un gran dedo» y otras a las que «les falta una parte muy considerable y notoria, la rabadilla». Con este material, Réaumur concibe un plan experimental para acoplar los dos tipos de ave en las diversas «combinaciones» posibles. Se puede, explica, hacer cohabitar una gallina de cinco dedos con un gallo de cuatro y viceversa, o bien animales con y sin rabadilla. Si de estas uniones nacen gallinas, la sola presencia o ausencia de rabadillas debería «indicarnos si es la hembra o el macho el depositario del germen original». La originalidad de este proyecto reside en la idea de analizar el comportamiento de un único carácter por hibridación, o a lo sumo dos, en vez de muchos a la vez. Es precisamente lo que, más de un siglo después, permitirá a Mendel fundar una ciencia de la herencia. Pero Réaumur no habla nunca de la realización del proyecto ni de sus resultados. Es con plantas como, una vez puestos en evidencia los fenómenos de la sexualidad, llegan a obtenerse algunos híbridos. Estos participan de los caracteres de ambos progenitores. Tienen una naturaleza intermedia, dice Koelreuter, «como en la unión de una sal ácida y una sal alcalina se forma una tercera sal que es neutra»[131]. Ciertos híbridos son fértiles. Entonces se ven aparecer o desaparecer ciertos caracteres de los padres a través de las generaciones. Esto no casa con la preformación.

Pero lo que el siglo XVIII no puede aún obtener del animal a través de la experiencia, lo obtiene del hombre a través de la observación. El hombre de quien aún no se ha erradicado del todo la fantasía de los productos del acoplamiento con otras especies, pero en quien se observan más fácilmente y con más seguridad algunas formas singulares. La observación no se limita ya a la simple constatación de los rasgos que en el niño recuerdan al padre, a la madre o a ambos, sino que se convierte en una encuesta genealógica en la que ciertas particularidades anatómicas se siguen remontándose a través de las generaciones. Maupertuis cita el siguiente laso: «*Jacob Ruhe*, cirujano berlinés, nació con seis dedos en cada mano y en cada pie; ha adquirido tal singularidad de su madre *Elisabeth Ruhe*, quien a su vez la había adquirido de su madre *Elisabeth Horstmann*, de Husiock. Elisabeth Ruhe la transmite a cuatro de los ocho

[131] *Citado en R. Olby, Origins of Mendelism,* Londres, 1966, pág. 154.

niños que ha tenido de Jean-Christian Ruhe, cuyos pies y manos no tenían nada de extraordinario. Jacob Ruhe, uno de los niños sexadigitales, se casó en 1733 en Dantzing con Sophie-Louise de Thüngen, que no tenía ningún rasgo extraordinario; han tenido seis hijos, dos de ellos sexadigitales. Uno de los dos, *Jacob Ernest*, tiene seis dedos en el pie izquierdo y cinco en el derecho; en la mano derecha tenía un sexto dedo que le fue cortado; en la izquierda sólo tiene una verruga en el lugar del sexto dedo. Se ve por esta genealogía que he seguido con exactitud que el sexadigitalismo se transmite tanto por el padre como por la madre»[132]. La misma anomalía reaparece en una familia de Malta descrita por Réaumur[133] y Charles Bonnet[134]. Los resultados de la encuesta llevan a las mismas conclusiones. Incluso el lenguaje y los métodos de las matemáticas pueden aplicarse a los fenómenos de la herencia. Para excluir el azar en la repetición de esta anomalía anatómica en el seno de una misma familia, Maupertuis se apoya en un cálculo de probabilidades. En una ciudad de 100.000 habitantes, la encuesta ha revelado la presencia de sexadigitalismo sólo en dos individuos. «Supongamos, cosa difícil, que haya pasado por alto otros tres, de manera que de cada 20 000 hombres uno sea sexadigital; la probabilidad de que su hijo o hija no nazca con sexadigitalismo es de 20.000 a 1; y la de que ni su hijo ni su nieto sean sexadigitales es de 20.000 veces 20.000, o 400.000.000, a 1; finalmente, la probabilidad de que dicha singularidad no se continúe durante tres generaciones sucesivas sería de 8.000.000.000.000 a 1; un número tan grande que la certeza de las cosas mejor demostradas en física no se acerca a esta probabilidad»[135]. Para hablar de los seres, el físico emplea el lenguaje del cálculo y el razonamiento que aplica a las cosas. Si las leyes del azar se aplican en un sitio, no se las puede ignorar en otro.

A lo largo del siglo XVIII, el estudio de los seres vivos ha ido pasando de los médicos a unos profesionales de nuevo cuño: los naturalistas. Pero aún no ha adquirido una individualidad, unos métodos, unos con-

---

[132] *Lettres;* Oeuvres, II, págs. 307-308.

[133] *Art de faire éclore...*, págs. 377 s.

[134] *Corps organisés, CCCLV;* Oeuvres, VI, págs. 749 s.

[135] *Corps organisés;* Oeuvres, VI, págs. 309-310.

ceptos e incluso un lenguaje que le sean propios. Por un lado, los éxitos de la taxonomía han establecido un orden dentro del caos de las formas visibles. Por otro, los progresos de la fisiología dejan entrever un orden oculto en la profundidad de los seres. Pero el orden visible y el orden oculto pertenecen todavía a parcelas distintas sin ningún punto de contacto entre ellas. Lo que ha construido la historia natural del siglo XVIII es un fresco, un conjunto de dos dimensiones, un sistema de coordenadas en el que puede insertarse el mundo vivo. Hay que esperar hasta el fin del siglo y, sobre todo, los primeros años del siglo siguiente para que el organismo adquiera una dimensión y una profundidad nuevas. Entonces se perfilarán nuevas relaciones entre la superficie y la profundidad de un ser, entre el órgano y la función, entre lo visible y lo invisible.

Con el concepto de generación, ni la formación de un ser vivo ni la persistencia de las especies podían escapar a las causas finales. Aun después del cambio de actitud que trasladaba la animación del mundo de las fuerzas ocultas a las leyes de la naturaleza, y de que éstas tomaran a su cargo incluso el desarrollo del germen, era necesario recurrir a una creación individual para cada ser vivo del pasado, el presente

o el futuro. En cierto modo, la idea de la preexistencia de los gérmenes equivalía a admitir la imposibilidad de explicar la generación sólo mediante las leyes del movimiento que se aplican a la materia inerte. Durante todo el siglo XVIII, el método de la ciencia experimental que utiliza la física se aplica poco al mundo vivo, el cual está aún impregnado de anécdotas, creencias y supersticiones. Si el concepto de especie une a los semejantes a lo largo del tiempo, su frontera sigue estando mal definida. Muchos monstruos han desaparecido, pero no todos. A pesar de las tentativas de Réaumur, siguen existiendo esos «amores abominables» de los que habla Voltaire: recombinaciones de órganos, seres fabulosos y genealogías fantásticas. En materia de hibridación, el límite entre lo posible y lo imposible sigue siendo impreciso. Pero, al mismo tiempo, el ejemplo de la física y sus éxitos en las tentativas de unificación de las mecánicas del cielo y de la tierra aumentan el peso de la observación y la experimentación para el desciframiento de la naturaleza, en detrimento de los sistemas. La actitud se acerca cada vez más a la expresada por Newton en la introducción de su *Óptica*: «Mi intención en esta obra no es explicar las propiedades de la luz por hipótesis, sino exponerlas al des-

nudo para demostrarlas mediante el razonamiento y la experiencia»[136]. La lógica de los hechos sustituye a la de los sistemas; y en el estudio del mundo viviente hay ciertos hechos, como la regeneración de los gusanos y los pólipos o el parecido del niño con su padre y su madre, que concuerdan mal con las teorías vigentes y con la existencia de un ser preformado en el germen.

El concepto de reproducción nace de todas estas observaciones. El término se aplica inicialmente a los fenómenos de regeneración en animales amputados. Lo que se reconstituye tras la amputación es el trozo que existía antes. Si se corta una pata a un cangrejo, la pata se regenera, se reforma, se reproduce. La palabra aparece por primera vez en una memoria de Réaumur publicada en 1712 en los trabajos de la Academia de Ciencias y titulada *Sur le diverses reproductions qui se font dans les crevisses, les Omars, les Crabes, etc. et entre autres sur celles de leurs lambes et de leurs Ecailles.*[137] Esta significación se conservará durante todo el siglo XVIII, especialmente en las memorias de Charles Bonnet. En el capítulo «Reproduction» de la *Encyclopédie*, se lee: «Por reproducción se entiende comúnmente la reproducción de algo que existía precedentemente y que ha sido destruido después. Ejemplo: la reproducción de los miembros del cangrejo». Parece ser que es Buffon quien amplía el significado del término. En su *Histoire naturelle des Animaux* de 1748, la reproducción designa no solamente la reformación de las partes amputadas, sino también la generación de los animales. El capítulo II, titulado «De la Reproducción en general», empieza así: «Examinemos de cerca esta propiedad común al animal y al vegetal, este poder de producir su semejante, esta cadena de existencias sucesivas de individuos que es la existencia real de la especie»[138]. Ligado así al concepto de especie, el término reproducción es empleado por todos. Aunque el artículo «Reproducción» de la *Encyclopédie* mantiene aún el sentido de reformación de la pata que falta, el artículo «Generación» dice: «Se entiende en general por este término la facultad de reproducirse que es propia de los seres

[136] *Traité d'Optique, lib. I,* trad. francesa, 1, Amsterdam, 1720, pág. 1

[137] Pág. 226.

[138] *Histoire naturelle des Animaux;* Oeuvres complètes, in-16, III, pág. 25

organizados». Incluso los preformacionistas convencidos hablan de reproducción. Charles Bonnet, por ejemplo, titula así un capítulo de su *Palingénésie philosophique*: «Otro rasgo de la excelencia de las Máquinas orgánicas. Sus reproducciones de diferentes géneros». Si el término reproducción es aceptado por todo el mundo, no sucede lo mismo con el sentido que le da Buffon. Durante el fin del siglo y principios del siguiente, autores como Haller, Charles Bonnet o Spallanzani seguirán pensando que los seres vivos nacen de gérmenes preformados.

Lo que busca Buffon, como Maupertuis, es dar con una solución distinta de la preformación para explicar a la vez la formación del semejante, la regeneración de las partes ausentes y los fenómenos de herencia bilateral. Más allá de la diversidad que se manifiesta en los modos de generación, se trata de descubrir, en palabras de Maupertuis, «los procedimientos generales de la naturaleza en su producción y su conservación»[139]. Para Buffon, interesa desvelar, detrás de las singularidades, «la mecánica de la que se sirve la naturaleza para efectuar la reproducción»[140]. Y esta mecánica está necesariamente oculta. No hay posibilidad de dar cuenta de la reproducción por la persistencia de la estructura visible. Tanto para Maupertuis como para Buffon, hay que hacer intervenir una estructura secreta, de orden superior, para unir y organizar los elementos de lo visible. Reducidas al único recurso del mecanicismo newtoniano y privadas de una experimentación ligada a técnicas y conceptos que no aparecerán hasta el siglo siguiente, estas tentativas están destinadas al fracaso. Pero la idea de reproducción, la búsqueda de un mecanismo común a todos los seres vivos, la necesidad de ir más allá de la superficie visible y de recurrir a una organización oculta, todo esto va a contribuir a hacer posible una biología, es decir, una ciencia de lo vivo.

[139] *Lettres;* Oeuvres, II, pág. 418.

[140] *Histoire naturelle des Animaux;* Oeuvres complètes, in-15, III, pág. 48.

# 2. La organización

Mientras los seres vivos se concebían como combinaciones de estructuras visibles, la preformación seguía siendo el medio más simple para la persistencia de esas estructuras a lo largo de las generaciones. La continuidad lineal del mundo vivo en el espacio y en el tiempo exigía la continuidad de las formas a través de los procesos mismos de la generación, la cual tenía por función perpetuar el orden visible. La especie representaba una entidad rígida, una totalidad permanente y un marco impuesto donde se insertaba el individuo. La filiación debía, pues, participar de la inercia del sistema.

Durante la segunda mitad del siglo XVIII y principios del siguiente va transformándose la naturaleza misma del conocimiento empírico. El análisis y la comparación no se ejercen ya solamente sobre los elementos que componen los objetos, sino sobre las relaciones internas que se establecen entre dichos elementos. Progresivamente, la posibilidad de existir se sitúa en el interior mismo de los cuerpos. Es la interacción de las partes lo que da su significación al todo. Los seres vivos se convierten entonces en conjuntos de tres dimensiones en los que las estructuras se superponen en profundidad, según un orden dictado por el funcionamiento del organismo considerado en su totalidad. La superficie de un ser está dominada por la profundidad, y los órganos visibles por funciones invisibles. Lo que rige la forma, las propiedades y el comportamiento de un ser vivo es su organización. Los seres vivos se distinguen de las cosas por su organización. A su nivel los órganos se articulan con las funciones. La organización es la que reúne en un todo las partes del organismo, la que permite a éste hacer frente a las exigencias de la vida, la que distribuye las formas en el seno del mundo vivo. La organización constituye una suerte de estructura de orden superior a la que se refiere todo lo perceptible de los seres. La transición del siglo XVIII al XIX verá así surgir una ciencia nueva que no tiene ya como meta la clasificación de los seres, sino el conocimiento de lo vivo, y cuyo objeto ya no es el análisis de la estructura visible, sino de la organización.

## La memoria de la herencia

Ya a mediados del siglo XVIII se emplea con frecuencia la expresión «seres organizados» o «cuerpos organizados» para referirse a los seres vivos. Pero la organización no representa entonces más que un grado particularmente elevado de complejidad en las estructuras visibles, en la disposición de los elementos que componen un cuerpo. La existencia de una estructura oculta sólo es exigida por la representación newtoniana del universo físico. A la combinatoria visible de las superficies y los volúmenes responde, en la mecánica de Newton, una combinatoria secreta de los corpúsculos que constituyen la materia. Lo que da sus cualidades a los cuerpos, y sus propiedades a las sustancias, no es sólo la naturaleza de los átomos componentes, sino también el juego de relaciones que se establecen entre ellos por atracción o por afinidad. Necesariamente, lo que confiere sus atributos a los seres vivos son las partículas que los constituyen y las relaciones que se establecen entre ellas. La estructura visible de un ser organizado, como la de las cosas, debe basarse en la disposición de las partículas y en su unión bajo el efecto de una fuerza similar a la atracción, que cohesiona el conjunto.

En la segunda mitad del siglo XVIII, la noción de una composición elemental de los seres vivos aparece en la mayoría de los escritos. Para el fisiólogo Haller, quien se esfuerza en analizar la disposición y el funcionamiento de los músculos y los nervios, un ser «está compuesto en parte de fibrillas y en parte por un número infinito de pequeñas láminas, que por sus direcciones diferentes dividen pequeños espacios, forman pequeñas áreas y unen todas las partes del cuerpo»[141]. La fibra es la unidad elemental con la que se construyen los cuerpos organizados. Esta representa para el fisiólogo lo que la línea para el geómetra. La «fibra más pequeña, o fibra simple, tal como la razón, más que los sentidos, nos hace percibir»[142] representa de alguna manera el término teórico del

[141] *Éléments de physiologie*, 1ª parte, *cap*. I, trad. *francesa*, Amsterdam, 1769, *pág. 3*.

[142] *Ibid., pág. 2.*

análisis anatómico, lo que puede ser resuelto con la punta del escalpelo separando los músculos, los nervios o los tendones. Sólo existe un tipo de fibra para constituir todos los órganos. Las fibras mismas se entrecruzan en todos los sentidos, en una trama continua que une las partes del cuerpo entre sí. Lo que da a un órgano su consistencia o su flexibilidad, su elasticidad o su rigidez, es el entrecruzamiento de las fibras, la ordenación de sus mallas más o menos apretadas, más o menos llenas de líquido. Las fibras poseen ya una estructura compleja, y su reunión confiere al organismo sus propiedades. En palabras de Charles Bonnet: «Las fibras menores, las fibrillas más pequeñas, pueden contemplarse como máquinas infinitamente pequeñas que tienen una función propia. La Máquina entera, la gran Máquina, resulta así del conjunto de un número prodigioso de maquinillas, cuyas acciones son todas concurrentes o convergen hacia una meta común»[143].

Pero la composición de los seres en unidades elementales no representa tanto una exigencia de la anatomía como de la lógica. Un grano de sal marina, explica Buffon, es un cubo compuesto de otros cubos, y apenas puede dudarse de que las partes primitivas y constituyentes de esta sal sean también cubos inimaginablemente pequeños. Del mismo modo, «los animales y las plantas, que pueden multiplicarse y reproducirse por todas sus partes, son cuerpos organizados, compuestos de otros cuerpos orgánicos semejantes, cuyas partes primitivas y constituyentes son también orgánicas y semejantes, y de las que discernimos a simple vista la cantidad acumulada pero no podemos percibir las partes primitivas más que a través del razonamiento y la analogía»[144]. La reducción de los organismos a un conjunto de unidades es, por lo tanto, una consecuencia directa de la teoría corpuscular de la materia, y en cierta forma la completa. Las unidades elementales que componen los seres organizados, que Maupertuis llama «partículas vivientes» y Buffon «moléculas orgánicas», son a los seres vivos lo que los átomos a las cosas. Así como la disposición de los átomos fija la forma y las cualidades de las cosas, la disposición de las partículas vivientes determina la figura y las propiedades de los seres. Como los átomos, estas unidades, que la vista no puede

[143] *Palingénésie philosophique, IX, 1*; Oeuvres, XV, pág. 350.

[144] *Éléments de physiologie,* 1ª parte, cap. I, trad. francesa, Amsterdam, 1769, pág. 3.

discernir pero que la lógica no puede evitar, representan el último término de todo análisis. Como los átomos, las unidades vivas están unidas /por la fuerza que los físicos llaman atracción y los químicos afinidad, y que cohesiona tanto los seres como las cosas. Al igual que los átomos, las unidades vivas son indestructibles. Pero no son átomos, son partículas de un tipo especial, específicas de los seres vivos. A fin de cuentas, la composición de los seres no se distingue de la de las cosas más que por la naturaleza de sus constituyentes elementales. Cuando un ser organizado muere, las partículas que lo constituyen no perecen, únicamente se disocian, quedando de nuevo disponibles para entrar en una nueva combinación y participar en la constitución de un nuevo ser. Estas partículas se encuentran por doquier en la naturaleza. Son tragadas o inhaladas por los organismos, que eligen las moléculas orgánicas y rechazan las «moléculas brutas». Las partículas vivas contribuyen primero al crecimiento del organismo y, una vez éste alcanza el estado adulto, el sobrante sirve para constituir su simiente reproductora. «El líquido seminal de cada especie», dice Maupertuis, «contiene una cantidad innumerable de partes apropiadas para formar con su unión animales de la misma especie»[145].

Tanto para Maupertuis como para Buffon, la reproducción de los seres vivos y su composición elemental van juntas. Para encontrar una solución al problema de la generación que sea distinta de la preformación hay que recurrir a un orden oculto tras el orden visible, y considerar un ser organizado, no ya como un objeto indisociable, sino como un conjunto de «partes primitivas e incorruptibles» que pueden reunirse o disociarse. «El conjunto de estas partes», dice Buffon, «forma ante nosotros seres organizados y, por consiguiente, la reproducción o la generación no es más que un cambio de forma que se opera por la simple adición de estas partes semejantes, del mismo modo que la destrucción del ser organizado se opera por la división de estas mismas partes»[146]. La producción de un ser vivo no supone ningún gasto de materia para la naturaleza, pues ésta combina las unidades que quedan disponibles por la muerte de los organismos. Lo que se reproduce a imagen de los padres en la generación de los seres organizados es la ordenación de las moléculas orgánicas, la

[145] Vénus Physique; Oeuvres, II, pág. 120.

[146] *Ibid.*, pág. 171.

disposición de las unidades que es propia de la especie, es decir, la organización.

Pero si el siglo XVIII está en condiciones de hallar en la estructura corpuscular de la materia una solución al callejón sin salida de la preformación, aún no dispone ni de los conceptos ni de los medios técnicos necesarios para que la estructura oculta postulada en los seres vivos pueda ser objeto de análisis. Por ejemplo, hay una identidad necesaria entre las moléculas constituyentes de los padres y el líquido seminal que servirá para dar forma al hijo. Cada líquido seminal contiene un muestrario completo de los distintos tipos de partículas que componen los diversos órganos. Así pues, todas las partes del cuerpo deben contribuir a la producción del líquido seminal con moléculas específicas. «La experiencia quizá podría aclarar este punto», dice Maupertuis, «si durante un tiempo suficiente se mutilaran algunos animales de generación en generación: posiblemente se observaría una disminución paulatina de las partes seccionadas, quizás hasta su desaparición total»[147]. Pero la experiencia ya se ha hecho, replica el preformacionista Charles Bonnet, porque ciertos pueblos tienen por costumbre amputar a cada macho un testículo, pese a lo cual los niños siguen teniendo dos al nacer[148].

Es la fuerza de atracción la que ensambla las partículas de los líquidos seminales para constituir el niño. Cada parte de éste se forma por la reunión de las partículas del mismo tipo procedentes del padre y de la madre, que se reconocen y se unen gracias a la afinidad especialmente elevada que existe entre las moléculas de idéntica naturaleza. Hay quien ha querido ver en esta atracción entre partículas semejantes de ambos padres un precedente de la unión específica entre cromosomas homólogos que observará la genética del siglo XX. Pero los siglos XVIII y XX hablan de cosas distintas. Para los genéticos, la combinación de los rasgos hereditarios a lo largo de las generaciones exige recurrir a factores independientes que gobiernan la expresión de los caracteres, pero totalmente diferentes de ellos tanto por su naturaleza como por su papel. Para Maupertuis, por el contrario, las partículas presentes en el líquido seminal se confunden con las que constituyen el cuerpo del organismo y le

---

[147] *De la Nature, IV*, pág. 17.

[148] *Palingénésie philosophique; Oeuvres, XV*, pág. 192.

confieren sus caracteres. Todo líquido seminal contiene una mayoría de partículas idénticas a las que componen el cuerpo del genitor. Es natural que el niño se parezca a sus padres, pues está formado por partículas idénticas. Al reencontrarse las mismas partículas en el líquido seminal generación tras generación, los rasgos se perpetúan por filiación. Pero «el azar o la penuria de los rasgos familiares darán lugar en ocasiones a otras agrupaciones»[149]. Dichas combinaciones fortuitas explican las generaciones insólitas, la producción de monstruos o la aparición de rasgos hereditarios nuevos, como la formación de un niño blanco por una pareja negra. Aunque el siglo XVIII esté en condiciones de imaginar un orden secreto que rija la forma y las propiedades de un ser vivo, no puede invocar estructuras situadas en niveles distintos. No distingue, por lo tanto, entre el «rasgo familiar», la partícula material que entra en la composición del cuerpo para darle ese rasgo y la partícula de líquido seminal que determina la reproducción.

Sin embargo, el siglo XVIII percibe claramente una exigencia propia de todo sistema en el que la forma de los padres se reproduce en el hijo generación tras generación por la combinación de unidades elementales. Se necesita la intervención de una «memoria» que guíe la reunión de las partículas. Mientras la estructura visible se mantiene por preformación, la memoria no es otra que la estructura misma. Si la formación de todos los gérmenes se remite a una creación simultánea el problema no se plantea. Pero, a partir del momento en que las partículas deben orientarse según la imagen de los padres, generación tras generación, es necesario que dicha imagen se conserve a través de las generaciones sucesivas. Hay entonces dos maneras de considerar el problema. Para el leibniziano Maupertuis, la memoria que dirige las partículas vivientes para formar el embrión no se distingue de la memoria psíquica. La materia misma está dotada de memoria, así como de «inteligencia, deseo o aversión»[150]. Las partículas vivas se atraen entre sí por afinidad, pero sólo la memoria que poseen explica su localización en el embrión. Cada una de ellas «conserva el

---

[149] *Ibid.*, págs. 219-220.

[150] *Du Lièvre; Oeuvres complètes, XV*, in-4, II, pág. 540.

recuerdo de su antigua situación y recurrirá a ella cuantas veces pueda para formar en el feto la misma parte»[151].

Para el materialista Buffon, por el contrario, lo que conserva la imagen de los padres en la generación y determina la posición de las moléculas orgánicas en el hijo, no es una virtud común a todo grano de materia, sino una estructura particular. Las partículas no pueden reencontrar la forma de los padres sin un modelo que las dirija, sin un molde que las ordene. «Del mismo modo que podemos hacer moldes mediante los cuales damos al exterior de los cuerpos la forma que queremos, supongamos que la naturaleza pueda hacer unos moldes mediante los cuales da, no sólo la forma exterior, sino también la forma interior»[152]. Porque lo que hay que reproducir para formar un ser vivo no es solamente la reunión de líneas, superficies y volúmenes que componen la figura visible, sino también la disposición interior, la estructura oculta de los órganos que determina el funcionamiento del cuerpo vivo. La reproducción de los seres vivos exige lo que Buffon llama un *molde interior*, único medio para «imitar el interior de los cuerpos». Buffon fue ridiculizado por sus contemporáneos y aun después por esta propuesta, pero percibió y analizó claramente una de las dificultades principales para explicar la reproducción y el crecimiento, dificultad que no fue superada hasta hace muy poco por la biología molecular. Es posible copiar estructuras de una o dos dimensiones, pero no de tres[153]. Buffon utiliza el modelo del molde, ya que el medio más evidente de reproducir un cuerpo en tres dimensiones es el del escultor que utiliza la huella dejada por dicho cuerpo en la cera o en el yeso. Pero la cera no «percibe», por así decirlo, más que la superficie del objeto. Al no poder «palpar» lo que hay bajo la superficie, ignora lo que sucede en el interior del objeto. Así pues, el molde reproduce únicamente la superficie del objeto, sin imponer orden interno alguno a la materia en el momento de la reproducción. El molde del escultor no basta, pues, para la reproducción de los seres; es necesario un *molde interior*. «Se nos dirá», explica Buffon, «que dicha expresión,

---

[151] *Supplément à la théorie de la terre, partie hypothétique*, Lªmemoria; *Oeuvres complètes*, in-4, IX, pág. 424.

[152] *L'Unau et l'Ai; Oeuvres complètes*, in-4, III, pág. 443.

[153] *Lettres sur les aveugles*, la Pléiade, pág. 871.

molde interior, parece a primera vista contener dos ideas contradictorias, que el molde sólo puede referirse a la superficie y que la superficie del interior debería relacionarse aquí con la masa; es como pretender combinar la idea de superficie y la idea de masa para hablar tanto de superficie masiva como de molde interior»[154]. La misma dificultad se encuentra al considerar el desarrollo del embrión, ya que el crecimiento de los órganos se verifica no en dos, sino en tres dimensiones. En contra de lo que suele creerse, dice Buffon[155], el desarrollo no puede realizarse por la simple adición de moléculas sobre las superficies, sino «por una admisión íntima y que penetra la masa». Es necesario, en efecto, que la materia utilizada para el crecimiento penetre en el interior de cada parte y en todas las dimensiones según «un cierto orden y una medida tal que no llegue más sustancia a un punto del interior que a otro».

El molde interior representa, por lo tanto, una estructura oculta, una «memoria» que organiza la materia para producir el hijo a imagen de los padres. Así, el hijo es producto de una epigénesis. Pero ésta ya no es una producción totalmente nueva como la contemplaba Aristóteles o el siglo XVI, una organización completa del ser a partir del caos de la materia, sino que el recuerdo de la organización ya realizada en los padres se conserva por la continuidad del molde interior. Dice Buffon: «Lo que hay de más constante, de más inalterable en la naturaleza, es la huella o el molde de cada especie, tanto en los animales como en los vegetales; lo que hay de más variable y corruptible es la sustancia constituyente»[156]. Por su parte, Maupertuis piensa en la existencia de una clase privilegiada de partículas vivas que conservarían, a través de las generaciones, los caracteres típicos de la especie: «Ese instinto [de las partículas], como el espíritu de una República, ¿está repartido en todas las partes que deben formar el cuerpo o, como en un estado monárquico, pertenece sólo a alguna parte indivisible? En tal caso, ¿no sería esta parte la que constituye propiamente la esencia del animal, en tanto que las demás no serían otra cosa que cubiertas o una especie de vestidos?»[157]

[154] *Vue de la Nature, 2." vue; Oeuvres complètes,* in-4, III, pág. 414.

[155] 155 *Dégénération des animaux; Oeuvres complètes,* in-4, IV, pág. 123.

[156] *Vue de la Nature, 2." vue; ibid.,* III, pág. 144.

[157] *Dénération des animaux; ibid.,* IV, pág. 144.

En el siglo XVIII, la idea de una composición elemental de los seres vivos queda aún fuera del alcance de la observación y la experimentación. Con los medios de que dispone, Buffon se las ingenia para demostrar la existencia de moléculas orgánicas, su repartición universal en la naturaleza y su capacidad de combinación. Sus resultados no convencen a nadie. Por otra parte, había que atribuir un origen a estas unidades vivas distintas de los átomos. A pesar de que Buffon atribuye su formación a la activación de la materia por el calor, apenas va más allá de las causas finales para asegurar su creación. Para los partidarios de la preformación, las unidades vivas sólo son una teoría añadida. Su efecto más inmediato es revitalizar la generación espontánea, pues si por todas partes existen moléculas orgánicas que pueden juntarse por efecto del calor, ¿por qué esa materia orgánica que, según Buffon, puede considerarse «un líquido seminal universal»[158] no produciría ese mundo invisible y extravagante que revela el microscopio, todos esos pequeños seres que ni siquiera merecen llamarse animales y que nadan en el agua de lluvia, en las infusiones de plantas o en el líquido seminal? La experiencia tiene algo que decir aquí, pues de nuevo depende de un mecanismo simple: como el calor mata los animálculos, basta con verter jugo de carne en un frasco, calentarlo y constatar si los animálculos siguen siendo capaces o no de multiplicarse. Es así como Needham observa que el calor no impide la multiplicación de esos pequeños seres. Pero Spallanzani, más meticuloso, no encuentra ningún animálculo vivo después de haber calentado el jugo de carne. Aun así, se puede seguir poniendo en duda el efecto del calor según se considere que actúa sobre la materia o sobre una fuerza. Los animálculos presentes en el jugo de carne o en el aire del frasco son la materia, y en tal caso la experiencia de Spallanzani elimina toda posibilidad de generación espontánea, incluso en los seres microscópicos. En cuanto a la fuerza, sería una propiedad del jugo de carne o del aire, una «fuerza generatriz», una «fecundancia», una «elasticidad» necesaria para la multiplicación de los animálculos, y en ese caso la experiencia no demuestra nada.

[158] *Système de la Nature; Oeuvres,* III, pág. 164.

¿Cómo probar que existe una tal fuerza, o que no existe? Aún tendrá que pasar un siglo antes de que el espíritu esté preparado para renunciar a la posibilidad de la generación espontánea.

Ni Maupertuis ni Buffon pretenden hacer metafísica con sus teorías. Como buenos newtonianos, intentan basar las propiedades de los seres vivos en las leyes de la física vigentes. Las unidades elementales, las partículas vivas, las moléculas orgánicas, no pretenden otra cosa que adaptar la interpretación mecanicista del mundo vivo a la interpretación newtoniana del universo. Como las cosas, los seres vivos se reducen a combinaciones de unidades, mediante las cuales, dice Buffon, «la naturaleza puede variar sus obras hasta el infinito»[159]. Con los cuerpos vivos sucede lo mismo que con las sustancias químicas: sólo los elementos poseen individualidad; los compuestos tienen únicamente una personalidad transitoria. El estudio de los seres se convierte entonces en la investigación de las leyes que rigen las combinaciones de estas unidades. La reproducción que exige la herencia bilateral observada en los híbridos no es otra cosa que el mecanismo que permite a las unidades agruparse. A partir de ahí va surgiendo una actitud nueva durante la segunda mitad del siglo XVIII. Tras la diversidad de estructuras, procesos y conductas que muestran los seres vivos hay que buscar una unidad de composición y de funcionamiento en el conjunto del mundo vivo. Al considerar los animales que respiran, Buffon ve en ellos «siempre el mismo fondo de organización, los mismos sentidos, las mismas vísceras, los mismos huesos, la misma carne, el mismo movimiento de fluidos, el mismo juego, la misma acción en los sólidos»[160]. Al analizar los cuerpos vivos no sólo son importantes los órganos accesibles a la observación, sino también la forma en que se articulan entre sí, es decir, su organización.

## La arquitectura oculta

A lo largo del siglo XVIII, la organización sólo describía la combinación de estructuras, el mosaico de elementos que caracteriza al ser vivo.

---

[159] *Vénus Physique; Oeuvres, II*, pág. 110.

[160] *Ibid.*, págs. 110-111.

Pero hacia el fin del siglo la organización adquiere un papel y una función distintos. Al sustituir progresivamente a la estructura visible, proporciona un fundamento oculto a los datos inmediatos de la descripción, a la totalidad del ser y de su funcionamiento.

Por un lado, se manifiestan las nuevas exigencias de la fisiología. Con el análisis de Lavoisier aumenta la importancia relativa atribuida a los órganos y su funcionamiento, y se impone la idea de que existen grandes funciones que satisfacen las necesidades del organismo. La necesidad de la coordinación de estas funciones se hace evidente. Si la respiración es siempre combustión, todo ser vivo debe poder procurarse oxígeno, cualquiera que sea su forma y su hábitat. Necesita encontrar combustible en los alimentos, llevarlos hasta el lugar de la combustión, eliminar los desechos, ajustar la temperatura, en suma, articular con precisión toda una serie de operaciones. Ya no se pueden considerar por separado los pulmones o el estómago, el corazón o los riñones. Un ser vivo no representa ya una simple asociación de órganos que funcionan de manera autónoma. Es un todo cuyas partes dependen unas de otras y cada una de las cuales desempeña una función particular de interés general.

Por otro lado, se modifica progresivamente la actitud de los naturalistas. A lo largo del siglo XVIII las especies eran casi siempre objeto de análisis anatómicos independientes. Se describía en detalle la estructura y las propiedades del león, de la abeja o del murciélago, de lo que da fe una literatura rica en monografías. En las postrimerías del siglo, por el contrario, la anatomía no se limita ya a describir cada órgano de manera aislada. Se busca vincular el órgano a la función, comparar el mismo órgano en distintos animales o los diferentes órganos en un mismo animal. Ya no basta con analizar la pata del caballo. Es necesario, como hace Daubenton, confrontarla con la pierna del hombre para precisar las analogías en el número de huesos, su forma, su función. O bien, como hace Camper, comparar el cerebro y el aparato auditivo de los peces con los del hombre para relacionar las similitudes estructurales con las similitudes funcionales. O también, como hace Vicq d'Azyr, establecer un paralelismo entre las distintas especies de carnívoros, entre la estructura de los dientes y la del estómago, de los dedos y de los músculos, para establecer las relaciones y demostrar su persistencia. Lo que importa ahora ya no es la diferencia externa, sino la semejanza profunda.

De este modo comienza a perfilarse toda una red de relaciones nuevas entre los seres. Durante todo el siglo XVIII, el carácter no representaba más que un fragmento del organismo, un elemento independiente, elegido por su utilidad para la taxonomía. Con la búsqueda de las semejanzas funcionales, el carácter sale de su aislamiento para convertirse en el elemento de un conjunto. No es que pierda su papel en la clasificación: para Vicq d'Azyr o Storr, conserva el valor que le habían otorgado Tournefort y Linneo. Sin embargo, el carácter no debe ser considerado aisladamente, sino en función de las relaciones que lo ligan al conjunto de las estructuras del organismo. En palabras de Lamarck: «Las relaciones son siempre incompletas cuando sólo tienen en cuenta un aspecto aislado, es decir, cuando están determinadas sólo por la consideración de una parte tomada separadamente»[161]. A partir de entonces, los caracteres tienen menos importancia que las relaciones entre caracteres. Mediante el análisis de estas relaciones se puede precisar la constitución de un ser y determinar su clasificación. No basta ya con observar en detalle las semejanzas y diferencias entre los organismos. Es necesario comparar sus masas enteras. Dice Goethe: «El espíritu debe abarcar el conjunto y deducir por abstracción un tipo general»[162]. Tras la combinatoria de los órganos se perfila una lógica del organismo.

Además, las diversas partes de un ser vivo no revisten ya la misma importancia en el conjunto del organismo. Para perpetuarse, la planta o el animal deben primero nutrirse y después reproducirse: todos los elementos del organismo están dispuestos en consecuencia. Si los caracteres no tienen igual valor, esto ya no es consecuencia de una gradación arbitraria basada sólo en las exigencias de la clasificación, sino de la importancia relativa de los órganos en el conjunto de la estructura. Existen diferentes órdenes de caracteres de peso desigual según su persistencia en los organismos. No basta con contar los caracteres, hay que sopesarlos. Un carácter de primer orden vale por varios de segundo orden, y así sucesivamente. «En la suma de caracteres», dice Antoine Laurent de Jussieu, «no hay que contarlos como unidades, sino cada uno según su valor relativo, de manera que un solo carácter constante sea equivalente e incluso superior

[161] *Essai de cosmologie; Oeuvres*, I, pág. 11

[162] *Ibid.*

a varios inconstantes tomados en conjunto»[163]. El peso y el lugar que ocupa un carácter en la jerarquía vienen determinado por su papel en la estructura del organismo. Los órganos de la fructificación no son importantes porque sean fáciles de clasificar: son fáciles de clasificar porque aseguran una función importante, la reproducción, y por ello reflejan la estructura de la planta en su conjunto. En *La flore française*, Lamarck afirma que «se debe prestar una atención especial a las partes de la fructificación, es decir, el fruto, la flor y sus dependencias. Este principio se basa, en primer lugar, en la preeminencia que se otorga de manera natural a los órganos que encierran las promesas de la generación futura y con los que se relaciona, como con su centro, el mecanismo subalterno de las otras partes que sólo parecen existir en función de los mismos»[164]. La subordinación de los caracteres remite a una jerarquía de las estructuras.

Así pues, a finales del siglo se modifican las relaciones entre el exterior y el interior de un ser, entre la superficie y la profundidad, entre órganos y funciones. Lo que deviene asequible al análisis mediante la comparación de los organismos es un sistema de relaciones que se articulan en la profundidad del ser vivo para hacerlo funcionar. Detrás de las formas visibles se perfila una arquitectura secreta impuesta por la necesidad de vivir. Esta estructura de segundo orden es la organización que reúne en una misma coherencia lo visible y lo oculto. Para Lamarck, «la organización es la más esencial de todas las consideraciones para servir de guía en una distribución metódica y natural de los animales»[165]. La organización dirige el análisis, pues «en los animales, la determinación de las principales relaciones se efectuará siempre según la organización interior»[166]. Permite recorrer el mundo viviente y poner orden en su complejidad, ya que «toda clase debe comprender animales diferenciados por un sistema particular de organización»[167]. Por ello pueden desarrollarse y coordinarse en el mismo espacio la diferencia de las estructuras y

---

[163] *Philosophie zoologique*, I, pág. 122.

[164] *Ibid.*, pág. 124

[165] *Ibid.*, págs. 2-3

[166] *Ibid.*, pág. 83

[167] *Ibid.*, págs. 81-82.

la persistencia de las funciones. Es la organización la que da a los seres vivos la ley interna que rige la posibilidad misma de su existencia.

La implantación del concepto de organización en el seno del mundo vivo tiene diversas consecuencias. La primera de ellas tiene que ver con la totalidad del organismo, que en lo sucesivo aparece como un conjunto integrado de funciones, es decir, de órganos. En un ser nunca deben considerarse las partes por separado, sino el todo o, como dice Lamarck, «la composición de cada organización en su conjunto, es decir, en su generalidad»[168]. Si se puede reconocer en las partes un valor y una importancia desiguales, siempre es en referencia a la totalidad. Donde más claramente se manifiesta esto es en las formas de organización más simple. «En los insectos especialmente», dice Lamarck, «es donde se empieza a observar que los órganos esenciales para la vida están repartidos casi por igual y la mayor parte están situados en toda la extensión del cuerpo, en vez de encontrarse aislados en lugares particulares, como sucede en los animales más perfectos»[169].

Seguidamente, el concepto de organización lleva al desarrollo de algo que el siglo XVIII ya había vislumbrado: la idea de que el ser vivo no es una estructura aislada en el vacío, sino que se inserta en la naturaleza y establece relaciones variadas con ella. Para que un ser se mantenga vivo, para que respire y se alimente, es necesario que se establezca un acuerdo entre los órganos encargados de estas funciones y las condiciones exteriores. Es necesario que la organización reaccione ante lo que Lamarck llama «las circunstancias». Por circunstancias se entienden los hábitats de la tierra o del agua, los suelos, los climas y las otras formas vivas del entorno de los organismos; en suma, toda «la diversidad de los medios en los que habitan».

Finalmente, con el concepto de organización se introduce un corte radical entre los objetos de este mundo. Hasta entonces, los cuerpos de la naturaleza se repartían tradicionalmente en tres reinos: animal, vegetal y mineral. En esta división las cosas estaban, por así decirlo, en pie de igualdad con respecto a los seres, lo que se justificaba por las transiciones insensibles y reconocidas tanto entre el mineral y el vegetal como

---

[168] *Ibid.*, pág. 231

[169] *Ibid.*, pág. 103

entre el vegetal y el animal. En las postrimerías del siglo XVIII, Pallas, Lamarck, Vicq d'Azyr, de Jussieu y Goethe redistribuyen las «producciones de la naturaleza» no ya en tres, sino en dos grupos, diferenciados únicamente por el criterio de la organización. Lamarck, a partir de 1778, dice así: «Observemos primero un gran número de cuerpos compuestos de una materia bruta, muerta y que aumenta por la yuxtaposición de las sustancias que concurren en su formación y no por el efecto de ningún principio interno de desarrollo. Estos seres reciben la denominación general de *seres inorgánicos o minerales*... Otros seres están provistos de órganos apropiados para diferentes funciones y poseen un principio vital muy marcado junto con la facultad de reproducir semejantes. Se les ha agrupado bajo la denominación general de *seres orgánicos*».[170] En adelante no existen más que dos clases de cuerpos. El inorgánico es el no-viviente, el inanimado, el inerte. El orgánico es el que respira, se nutre y se reproduce; es aquello que vive y «está necesariamente sujeto a la muerte[171]» Lo organizado se identifica con lo viviente. Los seres se separan definitivamente de las cosas.

Una vez aislados los seres vivos de los otros cuerpos, pero reunidos por la organización, el problema de la génesis del mundo vivo no se plantea ya en los mismos términos que la del mundo inanimado. Como propone Lamarck, ya no tienen por qué haber sido creadas simultáneamente en su complejidad todas o la mayor parte de las formas vivas, sino que se pueden hacer derivar unas de otras mediante una serie de variaciones sucesivas. Gracias a la acumulación de los efectos ejercidos sobre la estructura misma de los organismos por la tendencia de la naturaleza a la progresión, la serie continua de los seres en el espacio puede entonces resultar de una serie continua de transformaciones en el tiempo. La aparición y variedad de los seres descansan así en una característica de la vida misma: su poder de variación y de adaptación.

Poco a poco toma cuerpo el objeto de una ciencia que no estudia ya los vegetales o los animales en tanto que constituyentes de ciertas clases entre los cuerpos de la naturaleza, sino el ser vivo, al que una cierta organización confiere propiedades singulares. Casi simultáneamente, La-

---

[170] *Ibid.*, pág. 268

[171] *Ibid.*, pág. 29

marck, Treviranus y Oken utilizan el término «biología» para designar esta ciencia. «Todo lo que generalmente es común a vegetales y animales», dice Lamarck, «así como todas las facultades que son propias de cada uno de esos seres sin excepción, deben constituir el único y vasto objeto de la *Biología*: porque los dos tipos de seres que acabo de citar son todos esencialmente cuerpos vivos, y son los únicos seres de esta naturaleza que existen sobre nuestro globo. Las consideraciones que forman parte de la Biología son, pues, totalmente independientes de las diferencias que vegetales y animales puedan presentar en su naturaleza, en su estado y en las facultades particulares que puedan tener algunos de ellos»[172]. Provista así de un nombre y un objeto de estudio, la nueva ciencia irá perfilando progresivamente sus conceptos y técnicas propias a lo largo del siglo XIX. Más allá de las diferencias de forma, de propiedades y de hábitat, se trata de descubrir los caracteres comunes a los seres vivos y dar contenido a la palabra «vida».

## La vida

Con el racionalismo predominante en el siglo XVII, el conocimiento descansaba en la concordancia entre el objeto y el sujeto, entre las cosas y la representación que el espíritu se hacía de ellas. Con la aparición de lo que Kant llama un campo trascendental, a finales del siglo XVIII aumenta el papel del sujeto en su investigación de la naturaleza. A la armonía preestablecida sucede la dominación de la facultad de conocer sobre los objetos de conocimiento. Para descifrar la naturaleza y hallar sus leyes no basta ya con investigar y agrupar las identidades y las diferencias entre las cosas y los seres a fin de disponerlos en las series de una clasificación bidimensional. Es necesario que los datos empíricos se articulen en profundidad, que se escalonen en función de sus relaciones con un elemento de unificación, que sea condición de todo conocimiento y, a la vez, exterior al mismo. Como en todo dominio empírico, el análisis interno no basta ya por sí solo para dar cuenta del mundo vivo. La vida sirve de referencia, de trascendencia, para permitir a la conciencia unir las representaciones y establecer relaciones, no solamente entre los

[172] *Ibid.*, pág. 168.

diferentes seres, sino también entre los diferentes elementos de un mismo ser. En el estudio del mundo vivo, la vida es la que permite alcanzar verdades a posteriori y realizar una síntesis.

La noción misma de organización, sobre la que se fundamenta el ser vivo a partir de entonces, no puede concebirse sin un fin que se identifique con la vida. Un fin que ya no viene impuesto desde fuera porque haya que atribuir a una inteligencia suprema la producción de los seres, sino que encuentra su origen en el interior mismo de la organización. La idea de organización, de totalidad, exige una finalidad en la medida en que no es posible disociar la estructura de su significación. Si observamos una figura geométrica trazada en la arena, podemos estar seguros de que los elementos de esa figura no están reunidos allí por azar[173]. Dichos elementos están unidos aparentemente por una relación de exterioridad; sin embargo, es el conjunto de la estructura el que determina la posibilidad de su cohesión, el que representa el orden en medio del desorden. Librados al azar de los vientos, de las lluvias y de toda clase de avatares, la arena tiende a nivelarse y el dibujo a borrarse. La figura sólo puede formarse y mantenerse gracias a una fuerza interna que lucha contra el azar y la destrucción. Es un producto organizado de la naturaleza, todo es fin y todo es medio.

«Cada ser», dice Goethe, «encierra en sí la razón de su existencia; cada una de las partes actúa sobre las otras;… también es cada animal fisiológicamente perfecto»[174]. La finalidad del ser vivo halla así su origen en la idea misma de organismo, porque las partes deben reproducirse recíprocamente, porque deben unirse entre sí para formar un todo, ya que, como dice Kant, «los seres organizados deben organizarse ellos mismos»[175]. Kant recoge, en forma algo modificada, el argumento del reloj aducido por Fontenelle. En un reloj, una parte es el instrumento para el movimiento de otras partes; sin embargo, un engranaje nunca es la causa eficiente que produce otro engranaje. Una parte existe *para* otra, no *por* otra. No es en la naturaleza de los engranajes donde se halla la causa de su producción, sino fuera de ellos, en un ser capaz de llevar a la práctica

---

[173] *Ibid.*, pág. 144.

[174] *Ibid.*, pág. 28.

[175] *Ibid.*, pág. 226.

sus ideas. El reloj no puede producir las partes perdidas, ni corregir sus defectos por la intervención de las otras partes, ni rectificarse a sí mismo. Así pues, un ser organizado no es sólo máquina, ya que ésta sólo posee una fuerza de movimiento, mientras que el organismo contiene en sí una fuerza de formación y regulación que comunica a los materiales que lo constituyen.

En el siglo XVII, mientras sólo se trataba de demostrar la unidad del universo, los seres debían estar sometidos a las leyes de la mecánica que rigen las cosas. Para caracterizar las fuerzas que animan los cuerpos organizados se hablaba del movimiento que se produce ininterrumpidamente en los sólidos y en los fluidos. La inexistencia de la idea de vida aparece en la definición que de ella da la *Encyclopédie*, casi una perogrullada, ya que la vida «es lo opuesto a la muerte». A principios del siglo XIX, por el contrario, interesa precisar las propiedades de lo viviente. El estudio de los seres ya no puede tratarse como una prolongación de la ciencia de las cosas. Para analizar lo viviente se necesitan unos métodos, unos conceptos y un lenguaje propios, dado que en la ciencia las palabras introducen conjuntos organizados de ideas que proceden de las ciencias físicas y no concuerdan con los fenómenos de la biología. Dice Bichat: «Si los hombres hubiesen estudiado la fisiología con anterioridad a la física, estoy convencido de que hubieran hecho numerosas aplicaciones de la primera en la segunda, que hubieran visto los ríos correr por la acción tónica de sus riberas, los cristales juntarse por la excitación que ejercen sobre su sensibilidad recíproca, los planetas moverse porque se excitan mutuamente a grandes distancias»[176]. Para el siglo XIX, resulta totalmente improcedente describir el funcionamiento de los seres organizados en términos de gravedad, afinidad y movimiento. Para mantener la cohesión del ser, para asegurar el orden de la materia viva en oposición al desorden de la materia inanimada, se necesita una fuerza de una calidad especial, lo que Kant llamaba «principio interior de acción»; se necesita la vida.

En la idea de organización está implícito a la vez lo que posibilita la vida y lo que está determinado por ella. Pero, aunque esté en el origen de todo ser, la vida escapa todavía al análisis de sus propiedades y sus fun-

[176] *Leçons d'anatomie comparée,* I, París, 2.ªed, 1835, pág. 2.

ciones. Es la fuerza oscura que confiere sus atributos a los cuerpos organizados, la que mantiene unidas sus moléculas pese a las fuerzas exteriores que tienden a separarlas. Es, como dice Cuvier, lo que da al cuerpo de una mujer joven «esas formas redondeadas y voluptuosas, esa elasticidad de movimientos, ese agradable calor, esas mejillas sonrosadas de voluptuosidad, esos ojos brillantes por el destello del amor o por el fuego del genio, ese rostro risueño por las sutilezas del espíritu o animado por el fuego de las pasiones. Basta un instante para destruir esta excelencia»[177]. El cuerpo vivo está sometido a la acción de diversas influencias que proceden tanto de las cosas como de los seres y tienden a destruirlo. Para resistir a tal acción, es necesario un principio de reacción. La vida no es más que ese principio de lucha contra la destrucción. Para Bichat es «el conjunto de funciones que se oponen a la muerte»[178]; para Cuvier es «la fuerza que resiste a las leyes que gobiernan los seres brutos»[179]; para Goethe es «la fuerza productora contra la acción de los elementos exteriores»[180]; para Liebig es «la fuerza motriz que neutraliza las fuerzas químicas, la cohesión y la afinidad entre las moléculas»[181]. La muerte es la derrota de ese principio de resistencia, y el cadáver no es más que el cuerpo vivo sometido nuevamente al dominio de las fuerzas físicas. Las fuerzas del orden, la unificación y la vida se hallan en lucha constante con las del desorden, la destrucción y la muerte. El cuerpo vivo es el escenario de esa lucha; la salud y la enfermedad reflejan las peripecias de la misma. Si ganan las propiedades vitales, el ser vivo recupera su armonía y sana. Si, por el contrario, las propiedades físicas acaban imponiéndose, acaece la muerte. Nada de todo esto se manifiesta en los cuerpos inanimados: las cosas, como la muerte, son inmutables.

Pero si, en el origen, la organización del ser, su funcionamiento, la totalidad de su arquitectura, exigen que intervenga un principio vital, el ser vivo termina por sumergirse en la vida. Mientras que las propiedades

[177] *Recherches physiologiques sur la vie et la mort* pág. 1.

[178] *Leçons d'anatomie comparée,* I, pág. 4.

[179] *Oeuvres d'histoire naturelle,* pág. 19.

[180] *Chimie organique appliquée a la physiologie animale*, trad. francesa, París, 1842, pág. 209.

[181] *Leçons d'anatomie comparée*, I. pág. 17.

físicas de la materia son eternas, las propiedades vivas de un ser son temporales. La materia bruta pasa por los cuerpos vivos para empaparse de las propiedades vitales. Los seres, dice Cuvier, se convierten «en una suerte de hogares en los que las sustancias muertas son acarreadas sucesivamente para combinarse entre sí… y de donde se evaden un día para caer bajo las leyes de la naturaleza muerta»[182]. Durante la vida de un ser, las propiedades físicas están, por así decirlo, «encadenadas» por las propiedades vitales; por eso son incapaces de producir los fenómenos que tenderían a producir de forma natural. Sin embargo, esa alianza no es duradera, ya que las propiedades vitales tienden por naturaleza a agotarse rápidamente. «El tiempo las gasta», dice Bichat[183]. Por el hecho de vivir, el organismo está condenado a morir. En cierto modo, el ser vivo se apropia del poder de la vida, lo fija y lo inmoviliza, pero sólo por un instante, pues es destruido por lo mismo que hace surgir la vida. «Si la vida es madre de la muerte», dice Cabanis, «la muerte, a su vez, da a luz y eterniza la vida»[184]. Lo vivo se reduce a un cúmulo de materia que la vida roza por un instante. Pero si las propiedades vitales se gastan en cada ser, se conservan a través del mundo vivo. Cada cuerpo vivo, tanto si surge de una semilla como de un feto, formó parte en otro tiempo de un cuerpo semejante. Antes de adquirir su autonomía, antes de llegar a ser a su vez la sede de una vida independiente, todo organismo ha participado de la vida de otro ser del que luego se ha desprendido. La vida se transmite de ser en ser por una sucesión ininterrumpida. La vida es continua.

La diferencia entre este vitalismo y el animismo del siglo precedente reside en que el recurso a un principio vital emana de la actitud misma de la biología, de la necesidad de separar los seres de las cosas y de fundamentar tal separación no en la materia, cuya unidad se reconoce, sino en fuerzas. El vitalismo funciona como factor de abstracción. La vida juega un papel preciso en el saber. A ella se le interroga en el animal o en la planta, es el objeto mismo del análisis. Representa esa parte desconocida que distingue al organismo de la materia inerte y a la biología de la físi-

---

[182] *Anatomie générale*, I, París, 1818, pág. 17.

[183] *Rapport du physique et du moral*, II, París, 1830, pág. 256.

[184] *Chimie organique appliquée a la physiologie animale*, pref., pág. 60.

ca. El vitalismo es tan esencial en los inicios de la biología como lo fue antes el mecanicismo; y no sólo para los naturalistas, los fisiólogos o los médicos: también para los químicos que estudian los compuestos orgánicos, es decir, las sustancias que constituyen los seres vivos o que son producidas por ellos. «Se puede considerar», dice Liebig, «que las reacciones de los cuerpos simples y de las combinaciones minerales preparadas en nuestros laboratorios no pueden encontrar ningún tipo de aplicación en el estudio del organismo vivo»[185].

## La química de lo viviente

A finales del siglo XVIII ya se estudiaba la composición de los diversos cuerpos orgánicos. Scheele y Bergman, especialmente, habían analizado toda una serie de ácidos orgánicos y aislado el «principio dulce de los aceites», la futura glicerina. Con el inicio del siglo XIX se perfeccionan los métodos de análisis gracias, en particular, a la electrólisis, y se precisa la teoría atómica. En el apartado «química orgánica» entra una gran variedad de compuestos que contienen siempre carbono e hidrógeno, con frecuencia oxígeno y en ocasiones nitrógeno, azufre y fósforo. Estos compuestos representan los constituyentes mismos de los seres vivos o los productos de sus excreciones o su descomposición. Lavoisier había proporcionado a la química un método de clasificación y una nomenclatura universal. Con Berzelius se crea una notación universal. Cada elemento se representa con la primera letra de su nombre latino, seguida en su caso de otra para evitar confusiones. La fórmula de un cuerpo se establece por la yuxtaposición de los símbolos que corresponden a los elementos que lo constituyen; cada símbolo se acompaña de un coeficiente numérico que expresa el número de átomos presentes en la molécula. Este simbolismo, junto con el perfeccionamiento del análisis químico, hace posible manejar y representar las grandes moléculas que componen los seres vivos.

Ahora bien, para la constitución de una química de lo orgánico no basta con perfeccionar las técnicas de la química mineral. Es necesaria la intervención de la biología, la cual, por encima de la variedad de los

[185] *Chimie organique...*, pág. 171.

seres, empieza a precisar la unidad del mundo vivo. Mientras éste representaba una infinidad de estructuras, lo único que podía esperarse encontrar en él era una infinidad de compuestos. Si, por el contrario, lo vivo se caracteriza por una cierta organización y un determinado funcionamiento, si es siempre lo que se nutre, lo que crece y lo que se multiplica, entonces se puede buscar la naturaleza de los compuestos que lo distinguen de lo no-vivo, así como la de las reacciones con las que transforma los alimentos que incorpora a su propia sustancia. De este modo se delimita un dominio que por un lado incluye la química, ya que las sustancias de los seres vivos están formadas por constituyentes universales de la materia, y por otro concierne a la biología, ya que esas sustancias se distinguen radicalmente de las que estudia la química mineral.

Lo más directamente analizable de los seres vivos es el flujo de materia que los recorre, es decir, la «metamorfosis» de los alimentos en compuestos característicos y la expulsión de productos de desecho. La tarea de la química orgánica consiste, pues, en estudiar las transformaciones de las sustancias en el seno de los organismos y en reconocer la naturaleza de los elementos y combinaciones de entrada y salida. Esas transformaciones desafían las leyes de la química ordinaria: combinados de otras maneras, los elementos que componen los seres presentan propiedades totalmente distintas. La química orgánica debe identificar las sustancias que componen y recorren los organismos, y debe intentar analizarlas. Sin embargo, no está obligada a suministrar la prueba de las transformaciones por síntesis, porque, como dice Liebig:

«Todos los actos de la economía están subordinados a una actividad inmaterial de la que el químico no puede disponer a su antojo»[186]. Wöhler realiza en el laboratorio la preparación artificial de la urea manteniendo en ebullición una solución de cianato de amonio. Pero él mismo se niega a considerarla una síntesis de un compuesto orgánico a partir de cuerpos inorgánicos. Si bien el material de partida, el ácido cianhídrico, es un compuesto relativamente sencillo, sigue siendo una sustancia orgánica. En una carta a Berzelius, Wöhler dice así: «Un filósofo de la naturaleza diría que el carácter orgánico no ha desaparecido ni del carbono animal ni de esas combinaciones ciánicas, y que ésa es la razón por la

[186] Citado en J. Loeb, *La Dynamique des phénomènes de la vie*, París, 1908, pág. 14.

que de esos cuerpos pueden obtenerse otros cuerpos orgánicos»[187]. Habrá que esperar a que Berthelot obtenga acetileno a partir de carbono e hidrógeno para que desaparezca la barrera levantada por los químicos entre lo orgánico y lo mineral. Sin embargo, sólo a través del análisis, en la primera mitad del siglo XIX se pone en evidencia la presencia en los seres vivos de un número considerable de compuestos, algunos nitrogenados y otros no. Cada sustancia desempeña una función distinta en el organismo según su composición.

Las combinaciones de los mismos elementos poseen propiedades distintas según se trate de sustancias minerales u orgánicas. En los seres vivos existe, pues, una fuerza particular capaz de determinar un cambio de forma y de movimiento en la materia, de alterar y destruir el estado de reposo químico que mantiene combinados los elementos de las sustancias alimenticias destinadas al organismo: es la fuerza vital. En palabras de Liebig: «Ella es quien provoca la descomposición de las sustancias alimenticias, altera las atracciones que sus partículas solicitan sin cesar; desvía las fuerzas químicas para agrupar a su alrededor los elementos de las sustancias alimenticias y producir nuevos compuestos… destruye la cohesión de las sustancias alimenticias y obliga a los nuevos productos a unirse bajo nuevas formas, distintas de las que adoptan cuando la fuerza de cohesión opera libremente»[188]. Las fuerzas químicas que agrupan los átomos en las moléculas minerales actúan en los cuerpos vivos como una resistencia que supera la fuerza vital. Si estas dos fuerzas fuesen de igual intensidad, no habría efecto, no habría ni crecimiento ni reproducción. Si la fuerza química ganase, el ser perecería. Para que el organismo viva, es necesario que gane la intensidad vital. La vitalidad no se puede atribuir a ningún órgano en particular, a ningún tejido ni a ninguna molécula. Es una propiedad del ser en su conjunto, una característica del todo, que resulta de «la reunión de ciertas moléculas bajo ciertas formas»[189], y que depende de la organización misma de los seres vivos.

Si la fuerza vital reviste una importancia tal a comienzos del siglo pasado, es porque desempeña un papel que más tarde la física atribuirá a

---

[187] *Chimie organique appliquée à la physiologie animale,* págs. 202-203.

[188] *Chimie organique appliquée à la physiologie animale*, págs. 171

[189] *Ibid., pág*. 215.

dos nuevos conceptos. Los seres vivos se presentan hoy como la sede de un flujo triple de materia, energía e información. En sus inicios, la biología es capaz de reconocer el flujo de materia, pero en lugar de los otros dos tiene que recurrir a una fuerza particular. En efecto, hasta mediados del siglo XIX las relaciones entre calor y trabajo son muy imprecisas. Con Carnot, el calor se asocia al movimiento de los corpúsculos que constituyen los cuerpos. La obra de Carnot permanece ignorada durante casi veinte años, pese a que más tarde constituirá el acta de nacimiento del segundo principio de la termodinámica, hasta que el principio de equivalencia y el concepto de energía permiten integrar el conjunto de fenómenos en los que interviene el calor. Entretanto, es preciso encontrar un factor que neutralice las fuerzas de afinidad que operan entre las moléculas de los elementos y que los redistribuya mediante enlaces químicos distintos, que reagrupe los átomos en nuevas combinaciones. Hay que recurrir a una fuerza que, en las plantas, con el concurso de la luz solar, separe el oxígeno de los elementos con los que tiene mayor afinidad y lo expulse en estado gaseoso. Dice Liebig: «Una cierta cantidad de fuerza vital debe gastarse para mantener en orden los elementos de los principios nitrogenados, la forma y la composición que los caracterizan, o para oponer resistencia a la acción incesante del oxígeno atmosférico sobre sus elementos, así como del oxígeno secretado por la respiración de los vegetales»[190]. Eso es precisamente lo que postula la bioquímica moderna, cambiando fuerza vital por energía. Para Berzelius, para Liebig, para Wöhler, para Dumas, la vitalidad no representa un principio que actúa a distancia, como la gravedad o el magnetismo, sino una fuerza que ejerce su efecto «en el seno de un agregado material», cuando las sustancias de la reacción se hallan en contacto. La vitalidad exige para manifestarse un cierto grado de calor, ya que todos los fenómenos de la vida cesan cuando el organismo es expuesto al frío. La combustión del oxígeno atmosférico con ciertas sustancias de los alimentos proporciona el calor. Las sustancias susceptibles de oxidarse y ejercer así esta «función respiratoria» son fundamentalmente compuestos sin nitrógeno, como los azúcares y las grasas.

---

[190] *Chimie organique appliquée à la physiologie animale, pág. 218*

Las sustancias nitrogenadas, por el contrario, desempeñan una «función plástica» en la constitución de los tejidos y los órganos. Pero explicar su composición y su producción presenta dificultades que exigen recurrir una vez más a la fuerza vital. En todos los seres, en todos los tejidos que se estudian, se pone de manifiesto, la presencia de sustancias nitrogenadas muy complejas y, sin embargo, semejantes. El análisis de los compuestos nitrogenados presentes tanto en la sangre —la fibrina y la albúmina— como en la leche —la caseína— revela siempre una mezcla de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, en proporciones rigurosamente constantes, a lo que se añaden cantidades variables de otros elementos, en especial azufre y fósforo. Así pues, debemos admitir que todos los tejidos vivos están formados por un mismo constituyente básico, capaz de fijar otros elementos en cantidades variables. Estas combinaciones son las que proporcionan sus características a los diferentes órganos y tejidos. Para subrayar su primacía, Mulder llama *proteína* a este constituyente básico. A través de la producción de proteína y su combinación con ciertos elementos se forja la arquitectura de los seres vivos. Según Liebig: «Hay que admitir como ley demostrada por la experiencia que las plantas elaboran combinaciones proteicas que la fuerza vital modela, bajo la influencia del oxígeno atmosférico y de los principios del agua, para crear todos los innumerables tejidos y órganos de la economía animal»[191]. Pero el hecho de que sustancias de composición semejante tengan propiedades distintas hace necesario invocar un nuevo principio. Hay que admitir que, en tales moléculas, los mismos átomos pueden ocupar posiciones distintas, y que es la posición de los átomos en la molécula lo que determina sus propiedades. La misma conclusión se extrae del análisis de una serie de cuerpos más simples. El análisis de pares de sustancias tan diferentes en sus propiedades como los cianatos y los fulminatos, o los ácidos racémicos y tartáricos, revela composiciones de elementos idénticas. Está claro que la posición de los átomos en la molécula determina sus propiedades. Berzelius da el nombre de isomería a esta diferencia de estructura con igualdad de composición. Existe, pues, un principio de orden, de estructura molecular, según el cual la naturaleza y las propiedades de una molécula dependen de la posición relativa de

[191] *Chimie organique...*, pág. 112.

sus átomos. Para la biología moderna, este orden molecular, esta opción entre estructuras posibles, se interpreta mediante los conceptos de entropía y de información. Para la química orgánica de principios del siglo XIX se hace necesaria la intervención de una fuerza misteriosa que ponga a cada átomo en su lugar.

En lo que respecta a los mecanismos de las reacciones que tienen lugar en los seres vivos, es evidente que éstos son distintos de los que maneja el químico en el laboratorio. No cabe duda de que la respiración es una combustión, como había demostrado Lavoisier, pero de un tipo particular. En los organismos los alimentos se consumen lentamente y a una temperatura moderada, no bruscamente y a alta temperatura como ocurre en un horno. En el laboratorio se puede carbonizar azúcar, pero no transformarlo en alcohol y gas carbónico como hace la levadura de cerveza, o en ácido butírico e hidrógeno como hacen unos trozos de queso. En los seres existen ciertos principios, ciertas sustancias llamadas fermentos o diastasas, que dirigen las reacciones químicas para remodelar las uniones entre elementos y transformar así un cuerpo en productos nuevos. Hay dos maneras de considerar la actuación de estos fermentos. Se puede creer, como Liebig, que ciertos cuerpos son capaces de transmitir algunas de sus propiedades a otros cuerpos. Los fermentos son entonces sustancias cuyos átomos se hallan en un estado de suma agitación y que transforman otros compuestos al transmitirles su propio movimiento. «Los fenómenos de descomposición sólo podrían explicarse por el efecto del contacto de un cuerpo que se encuentra ya en un estado de descomposición o de combustión… El movimiento existente en las moléculas de uno de estos cuerpos en reacción debe influir necesariamente en el equilibrio de las moléculas del cuerpo que está en contacto con él.»[192] Si la levadura de cerveza puede fermentar el azúcar, es porque ya contiene una sustancia en estado de «metamorfosis». En virtud de una naturaleza química propia de los fermentos, la descomposición desborda la esfera de influencia de esa sustancia y alcanza las moléculas de un compuesto vecino.

Pero también se puede, como hace Berzelius, relacionar las propiedades de los fermentos con una fuerza química nueva que se manifiesta en

[192] *Chimie appliquée a la physiologie végétale*, trad. francesa, París,1844, pág 18.

la transformación de ciertos compuestos, tanto minerales como orgánicos. En estado sólido o en solución, muchos cuerpos simples o compuestos son capaces de oponerse a las fuerzas químicas que mantienen la cohesión de otros compuestos y provocar así su transformación. Dichos cuerpos actúan de forma muy particular: modifican las relaciones existentes entre los átomos de una sustancia sin tener ellos mismos un papel químico en la reacción, ya que al final de la misma están intactos. Éste es el caso del manganeso, la plata o la fibrina de la sangre, que provocan la descomposición del agua oxigenada; o el ácido sulfúrico, que transforma el almidón en azúcar, al igual que la diastasa extraída de las semillas en germinación; o incluso el platino en limaduras, que es capaz de hacer arder el alcohol a temperatura ordinaria si es puro o de transformarlo por oxidación en ácido acético si se le añade agua. Para designar este tipo de reacciones de origen desconocido que tienen lugar en presencia de ciertos cuerpos, Berzelius introduce el término *catálisis*: «La fuerza catalítica consiste en que ciertos cuerpos pueden, con su sola presencia…, despertar unas afinidades químicas que de otro modo quedarían inactivas a la temperatura considerada… Opera un poco como el calor»[193]. Se puede establecer entonces cierto paralelismo entre las reacciones que se despliegan en los seres vivos y las reacciones catalíticas. La diastasa, por ejemplo, no se encuentra en el conjunto de la patata, sino en los «ojos», donde el almidón se transforma en dextrina y azúcar. Gracias a esta reacción catalítica, la región que rodea cada uno de los ojos se convierte en un centro de producción de jugos que asegura la nutrición de los tallos jóvenes. «Es probable», dice Berzelius, «que en la planta o en el animal vivo tengan lugar miles de procesos catalíticos distintos, gracias a los cuales los materiales brutos uniformes del jugo vegetal o de la sangre dan lugar a una cantidad de combinaciones químicas distintas…»

De este modo, a partir de ideas y de técnicas procedentes de la química, se constituye una ciencia empírica que tiene por objeto de estudio la composición de los seres vivos y que elabora progresivamente unos conceptos y un lenguaje propios. Poco a poco se precisa la naturaleza de esos compuestos fabulosos que parecen capaces por sí solos de formar los organismos. Una vez más, tras la complejidad de las arquitecturas

[193]Citado en J. Loeb, *La Dynamique des phénomènes de la vie*, pág. 18.

moleculares se perfila la simplicidad de una combinatoria. Este es el caso, por ejemplo, de las grasas y los aceites, que han sido desde siempre un objeto predilecto de los químicos. Desde la alquimia hasta el siglo XVIII no se dejó de triturar, amasar y quemar manteca de cerdo, sebos y mantequillas, sin poder precisar ni su naturaleza ni su composición. Gracias al empleo de métodos de análisis menos burdos, Chevreul determina que las grasas están formadas por la combinación de varios compuestos más simples; así como las aleaciones se obtienen amalgamando ciertos metales según ciertas proporciones, las grasas se constituyen por la combinación de un «principio dulce», la futura glicerina, con ciertos ácidos llamados grasos. El tipo de ácidos que se combina con la glicerina es lo que determina la naturaleza y las propiedades de un cuerpo graso.

En las reacciones que ponen en juego compuestos orgánicos, un elemento ocupa el lugar de otro, lo desplaza de alguna manera, sin destruirla arquitectura de la molécula. Estas «sustituciones» pueden afectar no sólo a elementos aislados, sino incluso a grupos de átomos, «radicales» que permanecen asociados a través de las transformaciones químicas. Los radicales pueden transferirse en bloque a una molécula, atrincherarse y recibir átomos suplementarios sin sufrir modificación alguna. Con la obra de autores como Dumas, Laurent, Gerhart, Wöhler y Liebig surgen familias de cuerpos, «tipos», «núcleos», a los cuales puede unirse una variedad de radicales cuya presencia confiere a la molécula ciertas funciones químicas: alcohol, aldehído, ácido, amina, éter, etc. En el conjunto de compuestos orgánicos se establece de este modo una clasificación de doble entrada. Por un lado están las series homólogas que permiten clasificar las sustancias en familias naturales según su composición. Por otro lado están las funciones químicas, que establecen una relación entre compuestos de familias distintas pero de propiedades semejantes.

En resumidas cuentas, la gran diversidad de compuestos orgánicos puede reducirse a una combinatoria de tipos y de funciones en número limitado. La variedad de las moléculas y de sus propiedades nace del movimiento de ciertos átomos o grupos de átomos que pueden desplazarse sin que el conjunto de la arquitectura se vea por ello modificado, algo parecido a la estructura de un edificio cuyas piedras o tejas pudieran cambiarse sin que los cimientos se viesen afectados. Detrás de la variedad de las formas vivas, de los órganos y de las sustancias, se perfila el

juego de las reacciones químicas que atacan los alimentos y los modifican para constituir las especies moleculares necesarias para la vida de los seres. Situada en la bisagra entre la biología y la química, la nueva ciencia intenta delimitar los contornos de la vida, cuya especificidad e irreductibilidad se afirman a principios del siglo XIX. La química orgánica da cuenta de la separación entre las cosas y los seres, entre lo que es asequible a las leyes de la física y lo que no lo es. Y es precisamente ese espacio el que va a reducirse al terminar el siglo y durante el siglo siguiente gracias a dos nuevas concepciones del orden de la materia: la que la mecánica estadística extraerá del desorden molecular y la que insertará la química física en la estructura de las moléculas.

## El plan de organización

A principios del siglo XIX, los naturalistas se esfuerzan por reconocer el orden reinante no sólo entre los seres vivos, sino también en el seno mismo del organismo. Los animales, más que las plantas, constituyen entonces los principales objetos de análisis. Si bien las plantas exhiben más claramente las combinaciones de sus estructuras, los animales demuestran de manera más neta las exigencias de la organización. Detrás de la arquitectura compleja de un animal se percibe el misterio de las funciones. Todo concurre para producir ese estremecimiento incesante que caracteriza la vida. Es en el comportamiento de los animales, en el paso de la salud a la enfermedad, en las amenazas que los acechan por todas partes, donde se hace más evidente la lucha entre las fuerzas de la vida y las fuerzas de la muerte.

Para estudiar la organización de un animal no basta con diseccionarlo, distinguir todos sus elementos y hacer una lista de ellos. Hay que analizar los órganos en función del papel que desempeñan en el organismo, en su conjunto. Sin embargo, el método químico sigue estando vedado a la fisiología. Separar las partes del cuerpo para estudiarlas supone desnaturalizarlas. Porque, como dice Cuvier, «las máquinas que constituyen el objeto de nuestras investigaciones no pueden ser desmontadas sin ser destruidas»[194]. Los detalles de la morfología se esfuman ante la tota-

---

[194] Carta a Mertrud, *Leçons d'anatomie comparée*, *I*, pág. 17.

lidad del ser vivo. La ordenación de las piezas anatómicas remite a una unión interna, a una coordinación de las funciones que articula las estructuras en profundidad. Si la función responde a una exigencia fundamental de la vida, el órgano no es más que un medio de ejecución. Mientras la función no se puede permitir ninguna fantasía, el órgano conserva ciertos grados de libertad. Recorriendo el reino animal es posible descubrir lo que se mantiene constante y lo que cambia, determinar la tolerancia de la función en relación a las variaciones del órgano. Los cuerpos vivos son, dice Cuvier, «una especie de experiencias preparadas por la naturaleza, que añade o sustrae diferentes partes a cada uno de ellos, como podríamos desear hacer en nuestros laboratorios, y nos muestra así el resultado de tales adiciones o sustracciones»[195]. Lo que interesa observar, detrás de la diversidad de las formas, es la comunidad de las funciones. Entre una pata y un ala, cuenta más la similitud funcional que la diferencia de estructura. El pulmón y la branquia pueden oponerse por sus arquitecturas, pero ambos son aparatos para respirar, sea en el aire o en el agua. Las diferencias morfológicas entre testículo y ovario, entre epidídimo y trompa, entre pene y clítoris, no deben encubrir la simetría que existe entre ambas series, la similitud de sus funciones y de sus relaciones anatómicas. Cualquiera que sea el organismo considerado, los fenómenos de la vida sólo pueden desarrollarse al abrigo de algo que los proteja de los elementos exteriores. Dice Goethe: «Que esa protección adopte la forma de piel, de corteza o de concha, poco importa; todo lo que tiene vida, todo lo que actúa como dotado de vida, está provisto de una protección»[196].

Esas semejanzas basadas en un criterio no ya de forma, sino de localización y de función, hacen resurgir el viejo concepto aristotélico de analogía. En efecto, los naturalistas admiten que las estructuras pueden variar en su conformación según la función que desempeñen en las distintas especies. Geoffroy Saint-Hilaire afirma que «se puede observar la extremidad delantera en sus diversos usos y en sus diversas metamorfosis y verla así aplicada sucesivamente al vuelo, a la natación, al salto, a la carrera; unas veces es instrumento para hurgar, otras veces garra para

[195] *Le Règne animal distribué d'après son organisation*, I, 1817, pág. 7.

[196] *Oeuvres d'histoire naturelle*, pág. 19

trepar, o bien es arma ofensiva o defensiva, e incluso puede llegar a ser, como en nuestra especie, el principal órgano del tacto y, en consecuencia, uno de los medios más eficaces para desarrollar nuestras facultades intelectuales»[197]. De hecho, tanto para Geoffroy Saint-Hilaire como para Cuvier, la palabra analogía abarca dos aspectos distintos que Owen distinguirá más tarde con los términos *homología y analogía*. La homología describe la correspondencia de estructura y la analogía la de función. Son homólogos los órganos que ocupan la misma posición y tienen una estructura similar en especies distintas, como el brazo humano y el ala del ave. Son análogos los órganos que, a pesar de las diferencias de estructura, posición y relaciones anatómicas, cumplen las mismas funciones en especies diferentes: tal es el caso, por ejemplo, del hígado, una víscera digestiva que se encuentra en formas diversas en los crustáceos, los moluscos y los vertebrados. Comparando animales de la misma clase, se aprecia que dentro de la gran diversidad de tamaños, formas y colores, hay ciertas regularidades en la estructura, la posición y las funciones respectivas de los órganos. Las variaciones de forma no se distribuyen al azar. Cada elemento se encadena con los demás para asegurar la armonía del conjunto. Dice Cuvier: «En la dependencia mutua de las funciones, en el auxilio que se prestan recíprocamente, se fundan las leyes que determinan las relaciones entre los órganos, y que son tan necesarias como las leyes metafísicas o matemáticas»[198]. Lo que constituye el objeto de análisis ya no es cualquier agrupación de estructuras entre una infinidad de combinaciones, sino un sistema de relaciones que se articulan en lo más íntimo del organismo. Para analizar los seres vivos, e incluso para clasificarlos, es necesario distribuirlos en torno a las grandes funciones: la circulación, la respiración, la digestión, etcétera. El estudio de las diferentes formas de desarrollar dichas funciones se convierte en la auténtica meta de la zoología, y su instrumento principal es la anatomía comparada.

Hay dos maneras de hacer anatomía comparada. Una es basarse casi exclusivamente en el estudio de la morfología. La referencia a la fisiología se hace limitando el análisis a grandes sectores funcionales, lo que

---

197 *Philosophie anatomique*, Paris, 1818, págs. 22-23.

198 *Leçons d'anatomie comparée*, Lª lección, pág. 50.

Geoffroy Saint-Hilaire llama «regiones». Se trata entonces de buscar las correspondencias de estructura, las «analogías», región por región. Se comparan, por ejemplo, las formaciones operculares de los peces con los huesecillos del oído de los vertebrados de respiración aérea; o los elementos de la laringe, la tráquea y los bronquios de los animales terrestres con los arcos, dientes y láminas cartilaginosas de las branquias de los animales acuáticos; o la composición, la forma, la localización y las relaciones anatómicas del hueso hioides en peces, aves y mamíferos. Tomando como patrón la especie en la que la región considerada presenta el máximo desarrollo, se intenta seriar los otros tipos morfológicos según los desplazamientos y las deformaciones del tipo de referencia. El mismo órgano suele manifestarse a través de las especies por una sucesión de transiciones graduales entre los tipos extremos. Bajo una forma u otra, uno acaba por encontrar las mismas partes y en igual número. La homología se establece entonces por sí sola.

Sin embargo, puede suceder que no haya ninguna posibilidad de reconstituir una serie, bien porque las formas de transición aún se desconocen, bien porque han desaparecido. Para identificar un elemento y reconocer sus analogías, es preciso recurrir a las «conexiones», porque la característica más constante de una región reside en las relaciones que se establecen entre sus partes. Con independencia de los cambios de forma, volumen o posición que pueda experimentar un elemento anatómico, siempre conserva las mismas relaciones de vecindad y permanece siempre conectado con los mismos elementos circundantes. Para Geoffroy Saint-Hilaire, «es más fácil que un órgano resulte alterado, atrofiado o destruido que transpuesto»[199]. El principio de las conexiones permite entonces identificar cualquier elemento extraordinario en una especie; casi siempre se trata del desarrollo no habitual de una formación que también existe en otro lugar. En el seno de una región dada las diferentes estructuras no son independientes. Existe un «equilibrio de los órganos» tal que el desarrollo excesivo de un elemento repercute en sus vecinos. Un elemento normal nunca adquiere una propiedad nueva sin que otro elemento de su sistema o relacionado con él no se vea afectado por ello. Según Geoffroy Saint-Hilaire, «si se da el caso de que un órgano adquie-

---

[199] *Philosophie anatomique*, pág. 30.

re un crecimiento extraordinario, la influencia se deja sentir en las partes vecinas, que a partir de ese momento no prosiguen su desarrollo habitual; pese a lo cual todas se mantienen»[200]. Cuando se examinan los huesos de la cintura escapular de los vertebrados desde el punto de vista de la función respiratoria, se observan variaciones de forma, tamaño y posición que permiten distinguir cuatro grados de desarrollo entre la hipertrofia y el esbozo rudimentario. En los peces, los huesos de la cintura escapular pasan por encima del corazón y por detrás de las branquias para ejercer funciones de esternón. Una misma formación puede así integrarse en los órganos vecinos sin cambiar de función o pasando a desempeñar otra. En palabras de Goethe: «La suma total del presupuesto de la naturaleza está fijada, pero puede disponer de cantidades parciales para gastar en lo que le plazca. Si quiere gastar por un lado, tiene que economizar por otro; ésta es la razón por la que la naturaleza nunca puede endeudarse ni quebrar»[201].

En suma, si la búsqueda de las conexiones no permite determinar las homologías, entonces hay que analizar la disposición de las regiones en el embrión. En efecto, en el curso del desarrollo embrionario suelen aparecer particularidades anatómicas que desaparecen luego en el adulto. De este modo es posible identificar, por ejemplo, los elementos óseos que constituyen el cráneo de los distintos vertebrados. El cráneo de los peces adultos parece estar compuesto por un mayor número de elementos que el de los mamíferos. Pero esta diferencia desaparece si se examine el cráneo de los embriones y se cuentan los huesos a partir de los centros de osificación. Se observa entonces, dice Geoffroy Saint-Hilaire, que «el cráneo de todos los animales vertebrados tiene aproximadamente el mismo número de elementos, y que esos elementos conservan siempre la misma disposición, la misma conexión, y sirven para fines semejantes»[202].

También se puede hacer anatomía comparada asociando más estrechamente la fisiología con la morfología. Los organismos ya no se estu-

---

[200] *Ibid.*, pág. 19.

[201] *Oeuvres d'histoire naturelle*, pág. 30.

[202] «Considérations sur les pièces de la tête osseuse», en *Ann. Mus. Hist. Nat*, 10, 1807, pág. 342.

dian región por región, sino en su conjunto. Las variantes estructurales sólo se comparan para ver qué funciones permanecen. La anatomía, dice Cuvier, se convierte en un instrumento para encontrar «las leyes de la organización de los animales y las modificaciones que dicha organización experimenta en las distintas especies»[203]. La existencia misma de un ser no depende únicamente de la realización de ciertas funciones, sino también de su coordinación. El cuerpo vivo no puede resultar de la simple reunión de unos órganos que se combinan de maneras diversas para satisfacer dichas funciones. Es necesario que la disposición que adopten forme un conjunto armonioso, porque, como afirma Cuvier, «en el estado de vida los órganos no están simplemente juntos, sino que se influyen mutuamente y todos concurren en un objetivo común… No existe función alguna que no precise de la ayuda y el concurso de casi todas las otras»[204]. Ciertas variaciones que no pueden coexistir se excluyen mutuamente. En cambio otras, por así decirlo, parecen atraerse, lo que no sólo ocurre con órganos vecinos, sino también con aquellos que, a primera vista, parecen más alejados y, por ende, más independientes. Del enlace de las funciones se deduce la «ley de coexistencia» que determina las relaciones entre órganos. «Un animal que sólo se alimenta de carne debe tener la facultad de divisar su presa, perseguirla, vencerla, despedazarla. En suma, necesita una visión aguda, un olfato fino, una carrera rápida, destreza y fuerza en las patas y en la mandíbula. Así, nunca coexistirán en la misma especie unos dientes afilados y aptos para cortar carne con unas patas rodeadas de córnea que sólo sirven para sostener al animal y no le sirven para cazar.»[205] De ahí la regla que establece que todo animal con cascos es herbívoro. Los cascos en las patas indican que el animal tiene molares de corona plana y un canal alimentario alargado. Las leyes que determinan las relaciones entre órganos con funciones diferentes se aplican igualmente a las distintas partes de un mismo «sistema» funcional cuyas variaciones deben coordinarse. En el sistema digestivo, por ejemplo, la forma de los dientes, la longitud, los repliegues, las dilatacio-

---

[203] *Le Règne animal*, I, pref., pág. 4.

[204] *Leçons d'anatomie comparée*, I, pág. 49

[205] *Ibid.*, págs. 56-57.

nes del tubo digestivo, el número y la abundancia de jugos gástricos, guardan siempre cierta relación.

Con la ley de la coexistencia, y las correlaciones que así se establecen, cambia totalmente la manera de observar y estudiar el ser vivo. Para Cuvier ya no se trata de observar los elementos de un organismo para compararlos con los de otro y deducir las variaciones. Las estructuras se superponen en profundidad, se ordenan según una regla secreta que hay que intentar descubrir a través de las analogías. Un ser vivo constituye un conjunto «único y cerrado». Todas sus partes se corresponden mutuamente y cooperan por acción recíproca. Si bien ninguna parte puede cambiar sin que cambien las demás, cada una de ellas considerada por separado permite caracterizar las otras. Tal es el caso de los órganos del movimiento y los huesos de los vertebrados. «Apenas existe hueso alguno», dice Cuvier, «que varíe en sus caras, en sus curvas, en sus prominencias, sin que los demás experimenten variaciones proporcionales; a la vista de uno solo de ellos, uno puede deducir, hasta cierto punto, cómo es todo el esqueleto»[206]. Sobre este principio se fundamenta la paleontología, ya que a partir de unos pocos elementos fósiles se reconstruyen organismos desaparecidos. Con la anatomía comparada, un fragmento hallado ya no es un elemento aislado. Es el índice de toda una organización.

Sin embargo, los órganos no están ligados únicamente por una red de correlaciones. Además están sometidos a una jerarquía impuesta por la existencia misma del ser vivo. A. L. de Jussieu ya había señalado la subordinación de los caracteres, pero ésta se basaba todavía en un criterio estructural: si ciertos caracteres se dan con mayor frecuencia que otros, es porque tienen mayor importancia. Para Cuvier, la importancia de un carácter equivale a la de la función que desempeña. La subordinación de las estructuras remite a una jerarquía funcional, a un sistema coordinado que regula la distribución de los órganos. La importancia relativa de un órgano se aprecia por las restricciones que impone sobre los demás. Ciertos rasgos conformacionales excluyen o, por el contrario, exigen la presencia de otros rasgos. Esto permite «calcular» las relaciones entre órganos distintos. Dice Cuvier: «Las partes, propiedades o rasgos conforma-

[206] *Ibid.*, pág. 58.

cionales que tienen el mayor número de relaciones de incompatibilidad o de coexistencia, es decir, que ejercen sobre el conjunto del ser la influencia más marcada, son los caracteres importantes *o dominantes*. Los demás son los caracteres subordinados»[207]. Los caracteres importantes se reconocen porque son los más constantes en la serie de los seres. Si se comparan las semejanzas entre los organismos, esos caracteres son los últimos en variar. Esto se aplica igualmente a las «funciones animales», como la sensibilidad o el movimiento voluntario propios de los animales, y a las «funciones vegetativas» de nutrición y de generación, comunes a animales y vegetales. El corazón y los órganos circulatorios constituyen un centro para las funciones vegetativas, como el cerebro y el tronco del sistema nervioso lo constituyen para las funciones animales. Pero, si se echa un vistazo al conjunto de los animales, se observa una degradación progresiva de ambos sistemas. «En los últimos de los animales ya no hay nervios visibles, ni fibras diferenciadas, y los órganos de la digestión están simplemente excavados en la masa homogénea del cuerpo. En los insectos el sistema vascular desaparece incluso antes que el sistema nervioso»[208]. La clasificación de los seres vivos ya no puede basarse sólo en criterios estructurales. Es la organización funcional la que subtiende las clases, la que acerca unos organismos a otros o bien los aleja. La correlación de las formas que resulta de la ordenación de los órganos motores, de la distribución de las masas nerviosas y de la extensión del sistema respiratorio va a servir de base para las divisiones dentro del reino animal.

Para el siglo XIX, la existencia misma de un ser vivo depende de una armonía entre sus órganos que se deriva a su vez de la interacción entre sus funciones. Estas relaciones acotan las posibilidades de modificación de los seres vivos. En el siglo XVIII, todas las diferencias observadas entre las formas vivas podían combinarse hasta el infinito para producir todas las variantes imaginables de cuerpos vivos. En el siglo XIX esta posibilidad no pasa de ser una abstracción; en materia de variaciones no todo está permitido. Sólo pueden realizarse aquellas combinaciones que satisfacen las exigencias funcionales de la vida. La estructura de un or-

---

[207] *Le Règne animal*, I, pág. 10.

[208] *Ibid*., págs. 55-56.

ganismo debe adaptarse a un plan de conjunto, un *plan de organización* que coordine las actividades funcionales. Pero si bien todos los resultados aportados por la anatomía comparada evidencian la existencia de dicho plan, éste no tiene la misma significación para Geoffroy Saint-Hilaire que para Cuvier. Según el primero, no se encuentran estructuras anatómicas que sean privativas de una especie. No hay ningún elemento que aparezca en un sitio y desaparezca en otro. En todo caso, puede haber modificaciones de tal magnitud que obstaculicen la determinación de las analogías. Esto se ve, por ejemplo, cuando cierto elemento de una región adquiere una importancia tal que los elementos vecinos quedan eclipsados y no se desarrollan normalmente. Aun así, todos los elementos siguen estando presentes. Lo más frecuente es que todos sean reconocibles, aunque estén reducidos a la mínima expresión, convertidos en «rudimentos» inútiles. «La naturaleza», dice Geoffroy Saint-Hilaire, «utiliza constantemente los mismos materiales y sólo demuestra su ingenio en la variación de las formas. En efecto, parece que estuviera sometida a unos antecedentes que hacen que tienda siempre a hacer reaparecer los mismos elementos, en el mismo número, en las mismas circunstancias y con las mismas conexiones.»[209] Parece como si la composición de los animales obedeciese a un plan único. No un plan para los vertebrados, otro para los moluscos y otro para los insectos, sino un «plan general» para todos los organismos del reino animal. Los vertebrados y los invertebrados, por ejemplo, se distinguen por una variación de las formas y no de los elementos constituyentes, que conservan su disposición y sus conexiones. Así pues, se puede decir, de acuerdo con Geoffroy Saint-Hilaire, que «cada elemento de los insectos tiene su sitio en los animales vertebrados, manteniéndose siempre en su lugar y siempre fiel, por lo menos, a una de sus funciones»[210]. Los insectos viven en el interior de su columna vertebral como los moluscos en su concha.

No es la primera vez que se lanza la idea de un plan de organización para el conjunto de los seres vivos. En la segunda mitad del siglo XVIII ya se había evocado a menudo esta idea. Para Buffon, siempre se encon-

---

[209] *Philosophie anatomique,* págs. 18-19.

[210] «Mémoire sur l'organisation des Insectes», en *J. com. des Sciences médicales, 5,* 1819, pág. 347.

traba «el mismo fondo de organización» a través del mundo viviente. Para Daubenton, existía un «proyecto primitivo y general». Para Vicq d'Azyr, la naturaleza parecía «funcionar siempre según un modelo primitivo y general del que no se separa sin pesar». Para Goethe, existía una «forma esencial con la que la naturaleza no cesa de jugar». La idea de un plan único que rige la composición de todos los organismos se fundamenta todavía en la antigua noción de la continuidad del mundo viviente, la cadena de los seres contemplada por el siglo XVIII. Para encontrar un solo modelo, un solo tipo de organización en el conjunto del reino animal, hay que seguir refiriéndose a una continuidad, ahora ya no visible a través de las formas, sino oculta en lo más profundo de lo viviente.

Es Cuvier quien viene a romper precisamente esa continuidad. El plan de organización se convierte en el eje donde, en cierta forma, se articulan dos series de variables, una exterior y otra interior a los cuerpos vivos. «Las diferentes partes de cada ser», dice Cuvier, «deben coordinarse para hacer posible el ser total, no sólo en sí mismo, sino en sus relaciones con su entorno»[211]. Por un lado está el mundo en el que vive el organismo y que determina lo que Cuvier llama sus «condiciones de existencia». El organismo no es una estructura abstracta que vive en el vacío. Ocupa cierto espacio en el que debe satisfacer todas las funciones que exige la vida. Se prolonga hacia el exterior por el suelo que pisa, el aire que respira, el alimento que absorbe. «Su esfera se extiende más allá de los límites del mismo cuerpo vivo». Entre lo viviente y lo que permite vivir se establece todo un juego de interacciones. Entre todos los posibles, lo viviente debe permanecer en los límites prescritos por las condiciones de existencia.

Por otro lado está la organización del cuerpo. La continuidad no se sitúa ya en las formas, en las estructuras, sino en las funciones que deben coordinarse para responder a las condiciones de existencia. Por medio de las funciones se distribuyen las analogías a través del mundo viviente. Aunque aparecen todas juntas en las especies superiores, van desapareciendo una tras otra conforme se simplifican las formas. En la medida en que se mantiene la armonía del conjunto, los agentes —es decir, los órganos— conservan toda la libertad para variar. En teoría, cada órgano

[211] *Le Règne animal*, I, pág. 6.

podría así modificarse hasta el infinito y, a su vez, cada variación podría combinarse con todas las variaciones de los otros órganos para formar un conjunto continuo. En la práctica no sucede así, pues los órganos no son elementos independientes. Unos actúan sobre otros. Si se observa cada órgano por separado, se ve cómo se degrada progresivamente en todo el mundo viviente. Todavía es reconocible como vestigio incluso en las especies en las que ya no tiene ninguna utilidad; parece como si la naturaleza no hubiera querido suprimirlo. Pero no todos los órganos siguen el mismo proceso de degradación en los animales. «De modo que, si se quisiera ordenar las especies según cada órgano concreto considerado, habría tantas series que formar como órganos reguladores se hubiesen escogido»[212].

En suma, lo que uno ve al recorrer el conjunto del reino animal no es una serie lineal que progresa de un extremo a otro a través de una sucesión de intermediarios, sino masas discontinuas totalmente aisladas unas de otras. Aunque siempre se encuentran las mismas funciones, éstas obedecen a jerarquías distintas y son ejecutadas por organizaciones diferentes. Así pues, no existe un plan único para el conjunto del mundo viviente, sino varios. «Existen cuatro formas principales, cuatro planes principales, si es que puede decirse así, a partir de los cuales parecen haber sido modelados todos los animales y, en consecuencia, las divisiones ulteriores no son más que modificaciones superficiales debidas al desarrollo o la adición de algunas partes que no cambian en nada la esencia del plan»[213]. Así pues, el mundo vivo está formado por islotes separados por fosas insalvables. Los cefalópodos, por ejemplo, no se encuentran «en camino de nada». No son producto del desarrollo de otros animales, y su propio desarrollo «no ha producido nada superior a ellos». Vemos, por consiguiente, cómo «la naturaleza da un salto» de un plano a otro. Entre sus producciones deja un «hiato manifiesto»[214]. Y para que quede bien clara la imposibilidad de relacionar los grandes grupos de animales mediante una serie continua, se les atribuye el término *ramificación*. Entre las dos primeras ramas no existe ningún matiz. Moluscos y

---

[212] *Leçons d'anatomie comparée*, I, pág. 60.

[213] *Le Règne animal*, I, pág. 57.

[214] Cuvier, *Mémoires sur les Céphalopodes*, París, 1817, pág. 43.

vertebrados no tienen nada en común, ni semejanza alguna en cuanto al número de partes o la organización. Sólo dentro de cada grupo, recorriendo cada una de las ramas, se pueden encontrar series, aunque no lineales.

«La sepia y los cefalópodos son tan sumamente complicados que es imposible hallar ningún otro animal susceptible de ser situado razonablemente entre ellos y los peces, y dentro de su clase hay una serie de desviaciones de un plan común tan continuado como entre los animales vertebrados, de modo que se puede descender de la sepia a la ostra como del hombre a la carpa; pero no se desciende por una sola línea, ni en una rama ni en la otra».

Así pues, se ha roto la cadena que hasta entonces enlazaba el conjunto de los seres vivos como si cualquier hueco entre dos organismos vecinos estuviese siempre rellenado por una infinidad de intermediarios. No sólo se ha abierto un abismo entre los seres y las cosas, sino también entre los grupos de seres vivos. El conjunto del reino animal ya no puede recorrerse por una serie única de gradaciones y matices. No se pasa ya de un extremo a otro añadiendo algo de estructura, algo de complejidad, algo de perfección. Lo que se reencuentra a través de todo el mundo viviente son las mismas exigencias funcionales. Las necesidades de alimentarse, de respirar, de reproducirse, están siempre presentes ya sea en el aire o en el agua, con calor o con frío, en la luz o en la oscuridad. La continuidad reside ahora en las funciones y no en los medios para realizarlas. Para desarrollar los seres, para adaptar su organización a las condiciones de existencia, la naturaleza procede a saltos. Un animal está replegado en torno a un «núcleo de organización», un centro que dirige la disposición en profundidad de sus estructuras. Se ordena en masas concéntricas alrededor del núcleo. A partir del centro se sitúan los órganos, los importantes en el interior y los accesorios en el exterior. Lo esencial se encuentra así hundido en lo más profundo del organismo, en tanto que lo secundario se sitúa en la superficie. El corazón de la organización prácticamente no puede variar, porque para modificarlo hay que cambiarlo todo, hay que reemplazar este plan por otro. Los órganos secundarios, por el contrario, pueden cambiar a su aire, con tanta más libertad cuanto menos importantes son, es decir, cuanto más cerca están de la superficie. Dice Cuvier: «Cuando se llega a la superficie, lugar escogido por la natu-

raleza de las cosas para situar precisamente allí las partes menos esenciales y cuya lesión entraña menos peligro, el número de variedades llega a ser tan grande que todos los trabajos de todos los naturalistas juntos aún no han conseguido darnos una idea»[215]. Los seres de un mismo grupo, idénticos en el centro de la organización, se separan progresivamente unos de otros a medida que nos acercamos a la periferia. Semejantes en lo oculto, divergen en lo visible. En las superficies es donde encontramos pequeñas series continuas que son el producto de numerosas variaciones. En profundidad, por el contrario, sólo pueden producirse cambios radicales, saltos de un plano a otro.

Así pues, a comienzos del siglo XIX se transforma la disposición espacial de los seres vivos. No sólo cambia el espacio en el que se despliega el conjunto de los seres, fragmentado en islotes aislados y dividido en series independientes, sino también aquel en el que se sitúa el propio organismo, formado por capas sucesivas replegadas en torno a un núcleo, las cuales se prolongan hacia fuera y lo unen con el mundo que lo rodea. También sufren una redistribución total las relaciones establecidas entre las partes de un organismo y las que unen todos los cuerpos vivos.

## La célula

La biología del siglo XIX está ya en condiciones de extender el análisis de la organización a otro nivel estructural más fino. Junto con la macroorganización, es decir, lo que el zoólogo considera cuando intenta discernir el plan que coordina las funciones vitales, subyacente tras la confusión de los órganos, se manifiesta una microorganización de los seres vivos. La estructura íntima de los cuerpos organizados, su composición elemental, es la que confiere, al margen de la diversidad de formas, una cualidad particular a la sustancia de cada ser, una consistencia y un conjunto de propiedades de las que están desprovistos los cuerpos inorgánicos.

Se suele atribuir al siglo XVII el descubrimiento de la célula. Pero, si bien la utilización de los primeros microscopios había permitido a Robert Hooke, Malpighi, Grew o Leeuwenhoek distinguir en cortes de corcho o

[215] *Leçons d'anatomie comparée,* I, pág. 59.

de ciertos parénquimas filas de alvéolos que Hooke bautizó con el nombre de «células», aquellas estructuras no tenían entonces ninguna función conocida ni era posible su generalización a la totalidad del mundo vivo. Cuando Maupertuis y Buffon intentaban introducir discontinuidades en la sustancia de los seres a partir de la idea de su composición elemental, no hacían más que comportarse como buenos discípulos de Newton. Partículas vivas y moléculas orgánicas no eran más que el medio para reencontrar en los seres vivos la naturaleza discontinua de la materia y ordenar el mundo de los seres conforme al de las cosas, de acuerdo con la mecánica del siglo XVIII. Ahora bien, para hacer concordar las propiedades de los seres con la estructura de la materia había sido necesario apelar a unas moléculas especiales, exclusivas de los seres vivos. Pero, en resumidas cuentas, la composición de los seres no se distinguía de la de las cosas más que por la naturaleza particular de sus moléculas. Para el siglo XVIII, el constituyente elemental de los cuerpos vivos era el último término del análisis anatómico, lo que se encontraba al disociar los músculos, los nervios o los tendones: la fibra. Con todo, en la mayoría de órganos la fibra era un ente de razón, un conglomerado de moléculas que ligaba una sustancia viscosa, el «gluten». A partir de Haller, sólo existía un tipo de fibra que formaba todos los órganos. Las mismas fibras se entrelazaban en una trama continua que se prolongaba del hueso al tendón, del tendón al músculo y del músculo al nervio y al vaso. La disposición de las fibras, la consistencia de la red que formaban, la cantidad de líquido retenido en las mallas, era lo que daba a un órgano su dureza o su blandura, su rigidez o su flexibilidad.

Con la biología del siglo XIX la situación cambia. Pese a la diversidad de formas, los mismos órganos cumplen siempre las mismas funciones. En lo que respecta a la estructura íntima de los órganos, ya no existen animales de sangre caliente o de sangre fría, mamíferos o reptiles, sino tendones o vasos, huesos o membranas que, por desempeñar siempre un papel semejante, deben tener forzosamente una naturaleza semejante. Si entre el músculo de una paloma y el de una rana se observan diferencias, éstas no se deben sólo al hecho de que uno pertenezca a un ave y el otro a un batracio, sino que son el resultado de unas circunstancias exteriores, unas funcionalidades y unas vecindades distintas. A la semejanza funcional debe responder una unidad de estructura.

Inversamente, con Pinel y Bichat, los diversos órganos que en un mismo ser vivo tienen papeles distintos no pueden tener la misma composición. «Una mínima reflexión basta», dice Bichat, «para concebir que estos órganos deben diferenciarse no sólo por la disposición y entrecruzamiento de la fibra que los forma, sino también por la naturaleza de dicha fibra; entre ellos existe tanta diferencia de composición como de tejido»[216]. Lo que confiere a un órgano sus propiedades ya no es sólo su forma, es ante todo la naturaleza, la especificidad del tejido que lo constituye. A simple vista, parece que en los cuerpos vivos exista una gran diversidad de tejidos. Sin embargo, esto es sólo apariencia, ya que el tejido no caracteriza el órgano, sino el «sistema»: nervioso, vascular, muscular, óseo, ligamentoso, etc. El sistema representa, en cierta medida, el punto de articulación entre la anatomía y la fisiología, por la calidad del tejido que lo constituye. Un cuerpo vivo está ocupado por capas de tejido, láminas membranosas que se extienden sobre varios órganos y dividen el espacio corporal en grandes dominios funcionales. El órgano sólo representa una región particular de un dominio, la conformación que reviste el tejido en un sector del sistema. Cualquiera que sea la localización de un órgano y sus relaciones de vecindad, hay que relacionarlo simultáneamente con su sistema para determinar su función y con su tejido para comprender sus cualidades.

Si ya no se tiene en cuenta el aspecto exterior de los tejidos, sino su consistencia, su espesor, su actividad, entonces la aparente diversidad tisular queda reducida a unos cuantos tipos, entre diez y veintiuno, según los anatomistas. Dice Bichat: «La naturaleza, siempre uniforme en su proceder, variable solamente en sus resultados, avara en los medios que utiliza, pródiga en los efectos obtenidos, modifica de mil maneras algunos principios generales que, aplicados de forma diferente, presiden nuestra economía y constituyen sus innumerables fenómenos»[217]. Si se clasifican las membranas según su estructura, sus propiedades y su función, pueden distinguirse dos grandes grupos: las membranas simples, «cuya existencia aislada sólo establece relaciones indirectas de organización con las partes vecinas», y las membranas compuestas, que resultan

---

[216] *Traité des membranes*, París, ed. 1816, pág. 29.

[217] *Ibid.*, pág. 28.

«de la reunión de dos o tres de las precedentes y que combinan caracteres a menudo muy distintos»[218]. Es en los tejidos donde residen las propiedades vitales, y de su asociación resultan los atributos de los organismos. Cada elemento, cada estructura, están cortados en un tejido como un vestido en una pieza de tela. Así como un cuerpo vivo está constituido por una agrupación de órganos que, encargado cada uno de una función, concurren en las propiedades del todo, un órgano suele estar formado por la intrincación de varios tejidos que, cada uno con su papel, dan a la estructura de conjunto una serie de cualidades. Un reducido número de tejidos es suficiente para asegurar la variedad del mundo viviente. «La química», dice Bichat, «tiene sus cuerpos simples que forman cuerpos compuestos mediante todas las combinaciones posibles… De igual modo, la anatomía tiene sus tejidos simples, cuyas combinaciones forman los órganos.»[219]

Con Bichat aparece un nivel de organización suplementario, intermedio entre el órgano y la molécula. Para el anatomista, el tejido constituye el último término del análisis, aquello a lo que puede reducirse un cuerpo vivo con la ayuda del escalpelo y de las tijeras. Las propiedades de un organismo o de sus partes no son inherentes a las moléculas de la materia que lo forma. Desaparecen en cuanto las moléculas se dispersan y pierden su organización. La organización de esas moléculas en tejidos es lo que confiere a lo viviente sus cualidades propias. Los tejidos forman las materias primas destinadas cada una al ejercicio de una función particular. Hay tejidos para los cartílagos o para las glándulas como hay telas para las camisas o para los abrigos. La misma palabra *tejido* indica la continuidad de la estructura. El ser vivo está formado por láminas ininterrumpidas, extensiones que se enrollan convirtiéndose en órganos, que se unen, se separan, se envuelven unas en otras, se prolongan de una estructura a otra vecina. La complejidad de los sistemas funcionales se resuelve por la simplicidad de la combinatoria anatómica. La continuidad del tejido responde en cierto modo a la totalidad del ser vivo, como lo exige la biología de comienzos del siglo XIX. El cuerpo vivo no se subdivide hasta el infinito. Ya no puede concebirse como una simple asociación de

[218] *Ibid.*, pág. 31.

[219] *Anatomie générale*, pág. 35.

elementos, como creían Maupertuis y Buffon. Aun cuando Oken intenta encontrar una composición elemental de los seres, no se trata ya de unidades autónomas o asociadas, sino de unidades fundidas en la totalidad del organismo. La idea nueva de Oken, de la que poco a poco emergerá la teoría celular, consiste en establecer un acercamiento entre los cuerpos de los animales grandes y los seres microscópicos, de ver en éstos los elementos de los que están constituidos aquéllos, en suma, de concebir los seres vivos complejos como formados por la asociación de seres vivos simples. La carne de los animales y los tejidos de los vegetales abandonados a la muerte y la destrucción se descomponen en una infinidad de «infusorios». Cada uno de estos seres minúsculos parece estar constituido de una gota de mucus, de la misma sustancia viscosa presente en todos los seres vivos. Para Oken, los pequeños animales así liberados tras la muerte representan en realidad los elementos que constituyen el ser vivo y que, dispuestos en alveolos o células, forman los tejidos. Pero para que el animal siga siendo una totalidad, las células no se hallan simplemente amontonadas como los granos de un montón de arena. Dice Oken: «Así como el oxígeno y el hidrógeno desaparecen en el agua, y el mercurio y el azufre se funden en el cinabrio, aquí se produce una verdadera interpenetración, un entrelazado y una unificación de todos los animálculos»[220]. Así pues, no existe incompatibilidad entre la idea de una composición elemental de los seres vivos y la de su totalidad, a condición de entender el ser vivo como una integración de gran número de unidades y su descomposición tras la muerte como una desintegración. Las unidades elementales no pueden simplemente unirse y conservar su individualidad en un ser complejo. Deben fundirse en una individualidad nueva que las trasciende. Las partes se disuelven en el todo.

Esta nueva actitud de la biología transforma las posibilidades mismas de la organización de los seres vivos en su estructura fina. Para el siglo XVII, la idea de un conjunto de partículas vivas que por afinidad concurren en un ser organizado no representaba más que un aspecto de la combinatoria por la cual se constituye cada cuerpo del universo. Las moléculas orgánicas no formaban más que una categoría particular de moléculas exclusiva de los seres vivos. En razón de su indestructibilidad, cada una

[220] Citado en M. Klein, *Histoire des origines de la Théorie cellulaire*, París, 1936, pág. 19.

de ellas, liberada tras la muerte, siempre podía entrar en una nueva combinación y reaparecer en un cuerpo vivo. Las propiedades de un organismo representaban la simple suma de las propiedades de cada molécula constituyente. En el siglo XIX las cosas son bien distintas. El interés se ha desplazado de las formas de los seres a la organización de lo viviente, y la biología puede establecer un acercamiento entre los organismos más complejos y los más sencillos. Haciendo del pequeño la unidad elemental del grande, la biología busca el divisor común de todos los seres vivos, la unidad animal o vegetal, por así decirlo. Esta unidad no puede ser una simple molécula, un elemento inerte, un trozo de materia. Se trata ya de un ser vivo, de una formación compleja, capaz de moverse, de nutrirse, de reproducirse; dotada, en fin, de los principales atributos de la vida. Sin embargo, un animal o una planta no pueden identificarse con la agitación de una multitud de pequeños seres independientes. Para considerar un organismo —con su unidad, su coordinación, su regulación— como compuesto de elementos vivos, hay que admitir que éstos no están simplemente asociados, sino integrados. Las unidades deben amalgamarse en otra unidad de orden superior. Deben someterse al organismo, abdicar de toda individualidad ante la del conjunto. Sólo con esta condición puede el ser indivisible estar compuesto de unidades elementales. El organismo no es una colectividad, sino un monolito.

Sólo cuando se ha admitido la posibilidad de una tal relación entre un ser vivo y sus constituyentes tiene sentido la estructura celular, alveolar o en panal de abejas vislumbrada en ciertos tejidos desde el siglo XVII. En pocos años se reúne un cúmulo de observaciones tanto sobre la composición de vegetales y animales como sobre su reproducción. Porque, como habían señalado Maupertuis y Buffon, el estudio de la reproducción de los seres no puede disociarse del de su constitución. La importancia de la teoría celular reside en que aporta una misma solución a dos problemas aparentemente distintos: al descomponer los seres en células, dotadas cada una de ellas de todas las propiedades de lo viviente, esta teoría proporciona al proceso de reproducción un significado y un mecanismo.

Esta es precisamente la época en la que el poder de resolución del microscopio se ve aumentado gracias al empleo de lentes acromáticas. Se examina toda clase de tejidos y por todas partes aparecen vesículas, utrículos, células más o menos apretadas, más o menos cimentadas entre

sí, separadas en ocasiones por meatos. Primero se observan en las plantas, ya que es en ellas donde las células se distinguen mejor por su tamaño y forma. Después se observan también en los tejidos animales. Incluso ciertos seres microscópicos tienen el aspecto de una célula. Una ameba, por ejemplo, no tiene órganos diferenciados; Dujardin la describe como una simple gota de sustancia «glutinosa, diáfana, insoluble en el agua, que se adhiere a las agujas de disección, que se contrae en mesas globulosas y se deja estirar como el mucus»[221]. Esta sustancia, que Dujardin denomina «sarcoda», será rebautizada como «protoplasma» por Purkinje y Von Mohl. Cuando se disocian los tejidos vegetales mediante la acción del calor o de ácidos, siempre aparecen las mismas vesículas, los mismos glóbulos limitados por una membrana. Se impregnan los tejidos con soluciones diversas para colorear ciertas regiones celulares con preferencia a otras. Poco a poco la célula deja de verse como una simple gota de mucus para aparecer como un pequeño edificio en el que se distinguen zonas de aspecto diverso, cavidades, granulaciones animadas de un movimiento incesante. En todas las células se observa la presencia de una masa única, más densa y oscura que el resto, que Brown denomina «núcleo». Sea cual sea su forma y función, sea cual sea su localización en el organismo, pertenezca a una planta o a un animal, la célula parece presentar siempre el mismo aspecto general, como si siempre se ajustase a un mismo plan.

Para el observador armado con el microscopio, todo ser vivo termina resolviéndose en una colección de unidades yuxtapuestas. La mayoría de los histólogos llegan a esta conclusión, que Schleiden generaliza para los vegetales y Schwann para los animales bajo la forma de una «teoría celular». Pero la teoría celular no se limita a la cuestión de la estructura. Con Schwann, la posición y el papel de la célula dan un giro. La célula deja de ser el último término del análisis de los seres vivos para convertirse a la vez en la unidad de lo viviente, es decir, la individualidad que detenta todas las propiedades, y en el punto de partida de todo organismo. «Las partes elementales de los tejidos», escribe Schwann, «están formadas por células, según modalidades semejantes, aunque muy diversificadas, de

---

[221] «Recherches sur les organismes inférieurs», en *Ann. Sc. naturelles*, 2.ª serie, IV, 1835, pág. 367.

modo que se puede decir que existe un principio universal de desarrollo para las partes elementales de los organismos y que este principio es la formación de las células»[222]. Lo interesante no es tanto encontrar células en todos los tejidos e incluso que todos los tejidos estén constituidos por células, sino que la célula misma posea todos los atributos de lo viviente, que represente el punto de partida necesario de todo cuerpo organizado.

La teoría celular pone por primera vez freno al vitalismo que había presidido la fundación de la biología al rechazar una de sus exigencias fundamentales. Para distinguir los seres vivos de los objetos inanimados se había hecho necesario ver en cada ser una totalidad indivisible. Para los zoólogos, los anatomistas o los bioquímicos, la vida debía residir en el organismo considerado por entero y no en tal o cual órgano, parte o molécula. Al no poder reducirse a elementos de orden simple, la vida permanecía inaccesible al análisis y desafiaba cualquier interpretación. De ahí la necesidad de encontrar en la estructura íntima de los seres una continuidad sobre la que fundamentar la trama de los tejidos de Bichat y la fusión de las células en la «masa infusional» de Oken, en la que se sumergía la individualidad de cada elemento. Son precisamente estas ideas de totalidad y de continuidad las que cuestiona Schwann al tomar en consideración, no ya la composición elemental de los seres vivos, sino las causas que rigen dos de sus principales propiedades: la nutrición y el crecimiento. Si se adopta el punto de vista vitalista, hay que situar las causas de estos fenómenos en el conjunto del organismo. Por la combinación de las moléculas en un todo, que es como se encuentra el organismo en cada etapa de su desarrollo, se produce una fuerza que da al ser la capacidad de tomar materiales de su entorno y de extraer los constituyentes necesarios para el crecimiento de cada una de sus partes. Ninguna de ellas, tomada aisladamente, posee la capacidad de nutrirse y de crecer. Pero también se puede considerar que, en cada una de las células, las moléculas están colocadas de tal modo que permiten a la propia célula atraer otras moléculas y crecer de manera autónoma. En ese caso las propiedades del ser vivo no pueden ya atribuirse a la totalidad, sino a

---

222 *Microscopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen*, 1839, trad. inglesa, Sydenham Soc., reed. en General Biology, I, 1966, pág. 161.

cada parte, a cada célula, que posee así una suerte de «vida independiente».

Para Schwann, todas las observaciones hechas sobre plantas o animales justifican este segundo punto de vista. ¿Acaso es el huevo de los animales otra cosa que una célula capaz de crecer y multiplicarse por sí sola? Ello es especialmente cierto para los huevos de las hembras que se reproducen por partenogénesis, ya que en tal caso no se puede evocar ninguna fuerza misteriosa que explique la fecundación. ¿Qué es la espora de la que nacen ciertos vegetales inferiores? ¿Y acaso no se pueden quitar fragmentos de ciertas plantas sin que los trozos pierdan por ello el poder de multiplicarse fuera del organismo? No existe, pues, ninguna razón para dotar de propiedades particulares a la planta tomada en su conjunto. «La causa de la nutrición y el crecimiento», concluye Schwann, «no reside en la totalidad del organismo, sino en sus partes elementales, las células»[223].

Así, la resolución del organismo en sus unidades elementales no suprime el poder de nutrirse, de crecer y de multiplicarse. La especificidad de lo viviente no es el atributo del organismo en su totalidad. «Cada célula», dice Schleiden, «lleva una doble vida: una vida autónoma con su desarrollo propio, otra vida dependiente por haberse convertido en parte integrante de una planta»[224]. El organismo ya no puede considerarse una estructura monolítica, una especie de autocracia cuyos poderes escapan a los individuos gobernados por ella. Se convierte en un «estado celular», una colectividad en la que, en palabras de Schwann, «cada célula es un ciudadano». Pese a estar construidas según un mismo plan, las diferentes células de un organismo adoptan tipos distintos y cumplen funciones diferentes según el tejido del que forman parte; cada tipo ejecuta alguna misión en interés de la comunidad. En la colectividad celular existe un reparto de tareas y una división del trabajo. La existencia de un ser es el resultado de la cooperación entre sus partes. Si bien el organismo determina las condiciones de su propia existencia, no es la causa de ella.

---

[223] *Microscopische Untersuchungen*, trad. inglesa reed. en *Great Experiments in Biology*, Englewood Cliffs, 1955, pág. 15.

[224] *Beitrüge zur Phytogenesis*, Muller's Archiv, 1838, pág. 1

Es, por lo tanto, a la célula a la que hay que atribuir las propiedades de lo viviente. No necesariamente en virtud de alguna fuerza misteriosa al servicio de una inteligencia suprema, sino más bien gracias a una ordenación particular de las moléculas que permite a la célula efectuar ciertas reacciones químicas. «Estos fenómenos», escribe Schwann, «se pueden clasificar en dos grupos naturales: en primer lugar, los relativos a la combinación de las moléculas que concurren en la formación de una célula y que pueden llamarse fenómenos celulares *plásticos*; en segundo lugar, los derivados de cambios químicos que tienen lugar en las partículas que componen la célula misma o bien en el citoblastema circundante, y que deben llamarse fenómenos *metabólicos*»[225]. La célula puede contemplarse como un individuo separado del resto del mundo por su membrana. Pero si la membrana aísla la célula, también es lo que le permite relacionarse con su entorno, tomar alimento y eliminar productos de desecho. Para explicar la facultad de la membrana de distinguir entre el interior y el exterior de la célula, deben atribuírsele ciertas cualidades. Hay que reconocerle, dice Schwann, «no sólo el poder de modificar químicamente las sustancias con las que entra en contacto, sino también el de separarlas de modo que ciertas sustancias aparezcan en el interior y otras en el exterior de la membrana; la secreción de las sustancias ya presentes en la sangre, como la urea, obra de las células renales, no podría explicarse sin dicha facultad celular»[226]. Para Schwann, nada hay en ello que requiera la intervención de una fuerza misteriosa. Sabido es que la corriente eléctrica provoca la descomposición de ciertas sustancias y la separación de sus elementos constituyentes. ¿Por qué no creer que las propiedades de las membranas se deben a la posición de los átomos que las constituyen? No es preciso recurrir a intencionalidad o fuerza vital alguna. Para hablar de los fenómenos orgánicos basta con hacer intervenir fuerzas que, como las de la física, actúan según «leyes estrictas de una necesidad ciega»[227].

La segunda faceta de la teoría celular se refiere a la producción de las células y de los organismos. No se trata ya aquí de composición y estruc-

---

[225] *Great Experiments in Biology*, pág. 16.

[226] *Ibid.*, págs. 16-17.

[227] *Ibid.*, pág. 14

tura, sino de origen. Cualquiera puede ver cómo se divide una célula y da origen a dos, como observa Siebold a propósito de la multiplicación de los protistas, esos seres constituidos por una sola célula. El organismo vivo puede compararse con una colonia de protistas; a partir de un huevo, el cuerpo de un animal se construye progresivamente mediante una serie de divisiones celulares. Pero si para Schleiden y Schwann una población de células se multiplica por división, toda célula no nace necesariamente de otra célula. En ciertas condiciones, las células pueden formarse también por una suerte de generación espontánea a partir de un «blastema primitivo». Con Virchow, sin embargo, desaparece la posibilidad de ver nacer una célula de algún magma orgánico:

«Allí donde aparece una célula, debe haber existido otra célula anteriormente, del mismo modo que un animal sólo puede proceder de otro animal y una planta de otra planta»[228]. La continuidad de las formas y de las propiedades que se observa a través de las generaciones no se aplica únicamente a los animales y vegetales, sino también a las unidades que los constituyen. La teoría celular adquiere entonces su forma definitiva, que se resume en la frase de Virchow: «Todo animal se presenta como la suma de cierto número de unidades vitales, cada una de las cuales lleva en sí todos los caracteres de la vida»[229].

Con la teoría celular, la composición y las propiedades de los seres se basan no ya en las exigencias de este o aquél sistema, sino en los elementos puestos en evidencia por la observación. A fin de cuentas, el análisis ha venido a dar contenido a la necesidad lógica de una combinatoria, ya intuida por Maupertuis y Buffon. Cualquiera que sea la naturaleza de un ser vivo —animal, planta o microbio— todos están construidos mediante las mismas unidades elementales. La disposición particular de las células, su número, sus propiedades, confieren a cada organismo su forma y sus cualidades específicas. Pero si la célula representa ya un grado elevado de complejidad, la estructura de los cuerpos se construye siempre a partir del mismo principio, tanto en el mundo vivo como en el mundo inanimado. Con la célula, la biología ha descubierto su átomo. La teoría celular

[228] *Die cellular pathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre*, Berlín, 1858, pág. 25.

[229] *Ibid.*, pág. 12

transforma el estudio de los seres vivos. Para averiguar las características de lo viviente, de ahora en adelante hay que estudiar la célula, analizar su estructura, buscar lo que tienen en común los diversos tipos de células, es decir, lo necesario para la vida celular o, por el contrario, lo que es distintivo, es decir, apto para la realización de ciertas funciones.

Lo que resulta más profundamente afectado por la teoría celular es el estudio de la reproducción de los seres vivos. Hasta aquel momento, la biología del siglo XIX se había limitado a proseguir el análisis emprendido en el siglo precedente. Poco a poco, el perfeccionamiento del microscopio y el rigor creciente de las observaciones habían puesto fin al viejo debate sobre la preformación y la epigénesis. Tras filtrar el esperma masculino, Prévost y el químico J. B. Dumas habían establecido de manera definitiva la necesidad de los animálculos, del «zoosperma», para la fecundación. Además, se había descubierto que el huevo de la hembra no se identifica con el folículo visto en el ovario por Graaf, sino con una masa blanquecina descubierta en el interior del folículo por Von Baer. En lo que respecta al desarrollo del embrión tras la fecundación, se convierte en objeto de observaciones sistemáticas. Se redescubren entonces, con mayor precisión en los detalles, los fenómenos ya descritos por C. F. Wolff casi un siglo antes. Lo que Von Baer observa tras la fecundación del huevo no es el crecimiento de un pequeño ser preformado, sino una sucesión de fenómenos complejos de los que emergen progresivamente las formas y estructuras del futuro organismo adulto. Al principio el huevo no es más que una pequeña bola que «se segmenta» en dos, luego en cuatro, y así hasta sumar un gran número de alvéolos unidos. Progresivamente se forman unos repliegues, unas «hojas» que se deslizan unas sobre otras, que se enrollan y se deforman dando lugar a protuberancias de las que nacerán a los órganos. Dice Von Baer: «El desarrollo del vertebrado consiste en la formación, en el plano medio, de cuatro hojas, dos de las cuales se sitúan por encima del eje y dos por debajo. Durante esta evolución el germen se subdivide en capas, lo que da lugar a la división de los tubos primordiales en masas secundarias. Estas últimas, incluidas en las otras, son los órganos fundamentales que tienen la facultad de formar todos los otros órganos»[230]. En una especie dada, el desarrollo del

[230] Citado en E. Haeckel, *Anthropogénie*, trad. francesa, París, 1877, pág. 165.

embrión se verifica siempre de la misma manera, según un mismo orden espacial y temporal, como si obedeciese a un plan determinado. Primero tiene lugar un continuo perfeccionamiento del cuerpo del animal mediante una creciente diferenciación histológica y morfológica. Después las formas esbozadas se van perfilando y precisando para dar lugar a estructuras más especializadas.

Cuando se consideran especies vecinas, en el seno de una misma familia se encuentran semejanzas notables en el desarrollo embrionario. Es lo que Von Baer llama la ley de las semejanzas embrionarias: «Tengo conservados en alcohol dos pequeños embriones que olvidé etiquetar, y actualmente me sería imposible decir a qué clase pertenecen. Podrían ser lagartos, pájaros o mamíferos muy jóvenes, tal es la similitud del proceso de formación de la cabeza y del tronco en estos animales. Las extremidades de dichos embriones no están aún formadas; pero aunque estuviesen en su primer estadio de desarrollo tampoco sabríamos mucho más, pues las patas de los lagartos y de los mamíferos, las alas y las patas de las aves, así como las manos y los pies del hombre, se desarrollan todos a partir de la misma forma fundamental.»[231] Lo mismo sucede con las larvas en forma de gusano de las mariposas, las moscas y los coleópteros: a menudo las larvas se parecen más entre sí que los insectos adultos.

A través del análisis del desarrollo embrionario en las más variadas especies, la embriología reencuentra en el mundo vivo la discontinuidad puesta ya de manifiesto por la anatomía comparada. Comparando la segmentación del huevo, el movimiento de las hojas embrionarias, el orden de aparición de los diferentes órganos, Von Baer no obtiene una serie continua de cambios a través del reino animal, sino unos grupos, unos «tipos» de desarrollo. Lo que observa son cuatro tipos principales que corresponden a las cuatro ramas de Cuvier. Mientras que el desarrollo embrionario difiere radicalmente de un grupo a otro, en el interior de cada grupo se manifiestan fenómenos semejantes. Más aún, las imposiciones de la organización limitan las posibilidades de variación no sólo en el espacio, sino en el tiempo. Las operaciones más importantes, centrales y profundas son las que se desarrollan primero. «Los rasgos más generales de un grupo», dice Von Baer, «aparecen en el embrión antes

[231] Citado en Darwin, *L'origine des espèces*, trad. francesa, París, 1783, pág. 462.

que los rasgos más especiales. Las estructuras menos generales nacen de las más generales, hasta que finalmente aparecen las más especiales». Antes que al ave, en el embrión se reconoce al vertebrado. Es como si los embriones tuviesen una historia tal que, para constituir un fondo común de organización en el seno de un mismo grupo, todos los miembros del grupo recorriesen al principio el mismo camino, deteniéndose los menos perfectos en algún punto del recorrido antes que los más perfectos.

Así pues, el huevo no representa ya una estructura rígida de la que surge una forma prefigurada. Es el origen de un sistema en el que tiene lugar toda una serie de reajustes sucesivos, en el que cada etapa conlleva la posibilidad de la etapa siguiente. En su desarrollo embrionario, el ser vivo aparece como producto de una sucesión de eventos que se engendran unos a otros, como si la organización se extendiese a la vez en el espacio y en el tiempo. No sólo el tiempo del desarrollo individual que acompasa el deslizamiento de las hojas y la aparición de los órganos; también un tiempo más lejano, más oscuro y profundo, que parece perfilar un nuevo tipo de relaciones entre ciertos seres vivos.

El estudio de las anomalías del desarrollo adquiere una nueva importancia. Con Broussais aparece un nuevo método de análisis de los seres vivos. En fisiología la experimentación suele consistir en una modificación del estado natural de un organismo para perturbar los fenómenos ligados a tal o cual función. Sin embargo, se puede lograr idéntico resultado mediante la observación de ciertos estados patológicos. ¿Qué es una enfermedad, sino la exageración o la deficiencia de ciertos procesos que tienen lugar en el animal sano? ¿Qué experimentos podrían conseguir una desviación de lo normal tan precisa y selectividad? Si el conocimiento del estado fisiológico es totalmente necesario para la interpretación de los estados patológicos, el estudio de lo patológico constituye un instrumento inestimable para el análisis del funcionamiento de los seres vivos.

La existencia de los monstruos cambia entonces de significado. Ya no se puede atribuir su formación a la cólera divina, al castigo por una falta secreta, a alguna represalia contra un acto o un pensamiento contra natura. Ya no se puede pensar que estos seres al margen del orden han sido preformados desde la eternidad y esperan, junto con los demás, su oportunidad de ver el día. Las deformaciones surgen en el curso del desarrollo embrionario como consecuencia de algún traumatismo del embrión. Si se

agitan violentamente huevos de gallina durante el periodo de incubación, saldrán unos polluelos afectados por toda clase de anomalías. Hasta entonces, el monstruo representaba, como dice Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, «la organización que, cansada de haber producido laboriosamente durante mucho tiempo, busca el descanso en los días saturnales, y se abandona a sus caprichos»[232]. El monstruo se convierte de ahora en adelante en un «ser herido durante la vida fetal». La monstruosidad es resultado de lesiones sufridas por el embrión, fallos en la sucesión de eventos que da forma al animal, errores en la ejecución del plan. Se habla de anomalías, de irregularidades, de vicios de conformación derivados de una interrupción del desarrollo o de su retraso. La vieja idea de los monstruos como seres extraños, productos de «creaciones sin Dios», como decía Chateaubriand, es reemplazada por la nueva idea de que se trata de seres obstaculizados en su desarrollo, cuyos órganos se conservan hasta el nacimiento en un estadio embrionario. Las mismas deformidades no parecen ser producto del azar. Afectan más a ciertas regiones del cuerpo y modifican su estructura, como si la evolución de las formas hubiese sido solamente desviada. Hay un rigor dentro de la anomalía. Según Isidore Geoffroy Saint-Hilaire: «La monstruosidad no es un desorden ciego, sino un orden distinto igualmente regular, igualmente sometido a unas leyes: es la combinación de un orden antiguo y de un orden nuevo, la presencia de dos estados que normalmente se suceden entre sí»[233]. No todo es posible en lo monstruoso. Las deformidades que se observan siguen ciertas pautas. Los seres monstruosos pueden clasificarse de la misma forma que los seres normales. Las anomalías obedecen a ciertas reglas de coordinación, de correlación, de subordinación. Ciertas anomalías pueden heredarse, pero la mayoría de ellas proceden de traumatismos sufridos por el embrión durante la vida fetal. La teratología, el estudio de los monstruos, va a proporcionar a la biología uno de sus principales instrumentos de análisis.

Con el estudio del desarrollo embrionario, con la observación de las etapas sucesivas en el huevo fecundado, quedan muy lejos las viejas teorías que todavía imperaban a principios de siglo. Sin embargo, la

---

[232] *Philosophie anatomique, II: Des monstruosités humaines*, París, 1822, pág. 539.

[233] *Histoire des anomalies de l'organisation*, I, París, 1832, pág. 18.

correcta interpretación de las imágenes del desarrollo, de las figuras discernibles en el huevo, exige que sean confrontadas con las de las células observadas en los tejidos. Las observaciones sobre la reproducción y el desarrollo del embrión contribuyen al establecimiento de la teoría celular, pero ésta a su vez da contenido a los aspectos más diversos de la generación. En definitiva, al igual que el huevo, el «zoosperma» no es más que una célula, aunque singular por su forma y función. La fecundación consiste, pues, en la fusión de dos células, una procedente del padre y otra de la madre. La segmentación y la formación de las hojas embrionarias visibles al microscopio son resultado de la división celular y de la diferenciación progresiva de las células que se preparan para cumplir distintas funciones y se disponen para constituir los órganos. Se llega así a la conclusión, afirma Remak, de que «todas las células o sus equivalentes en el organismo adulto se han formado por la segmentación progresiva de la célula huevo en elementos morfológicamente similares; y que las células que forman el esbozo de una parte cualquiera u órgano del embrión, aunque sean poco numerosas, constituyen el punto de partida de todos los elementos reconocibles (es decir, las células) que concurren en la formación del órgano una vez desarrollado»[234].

La formación de un ser vivo es, pues, una reproducción, una construcción que se renueva en cada nacimiento, generación tras generación. Pero, si bien esta producción no se reduce al crecimiento de un pequeño ser preformado, tampoco corresponde a una epigénesis total, a la organización repentina de una materia hasta entonces inerte. Los cuerpos organizados, dice Von Baer, no son «ni preformados ni, como se supone a menudo, formados repentinamente, en un momento dado, a partir de una masa informe»[235]. En el origen de todo ser vivo se encuentra siempre una de esas unidades que componen el ser vivo, una gota de protoplasma encerrada en su envoltura, es decir, una arquitectura que ya posee todos los atributos de lo viviente. Las formas de reproducirse son muchas y variadas: por escisión, como en los protistas; por partenogénesis a partir del óvulo materno solo, como en los pulgones; por fusión de dos células germinales, una paterna y otra materna, como en la mayoría de los ani-

[234] *Untersuchungen über die Entwicklung der Wirbelthiere*, Berlín, 1850, pág. 140.

[235] Citado en E.B. Wilson, *The Cell in development and Heredity*, 1925, pág. 1035.

males y plantas. Pero, sea cual sea el modo de reproducción, un organismo se forma siempre a partir de un fragmento de organismo. La vida se transmite mediante una parcela de los progenitores que se separa de ellos para crecer y multiplicarse de manera autónoma hasta reproducir una organización semejante a aquélla de la que formaba parte. Entre una generación y la siguiente no se produce una ruptura total; siempre persiste un elemento, una célula que se desarrolla progresivamente en un organismo. «A través de toda la serie de las formas vivientes», escribe Virchow, «se trate de organismos completos, animales o vegetales, o de sus partes constituyentes, existe una ley eterna de desarrollo continuo»[236]. La vida nace de la vida y sólo de ella. La formación de un ser por otro representa siempre una proliferación de células, una especie de germinación. El niño no es más que una excrecencia de los padres. Es la célula la que asegura la continuidad de lo viviente.

En el origen de todo organismo hay, por lo tanto, una unidad tomada de la generación precedente. Dicha unidad se divide por segmentación y las células así formadas se diferencian para cumplir funciones distintas, se asocian en tejidos y órganos, constituyen estructuras de las que surge poco a poco la arquitectura del animal o la planta. Cada organismo constituye un clon, una asociación de tipos celulares diversos, pero procedentes todos de la misma célula inicial, el huevo. Las formas y propiedades de un organismo están determinadas por el número de células, la variedad de tipos celulares y su disposición. La combinación de las células asegura la diversidad del mundo viviente. Pero cuando una célula se separa de un ser para formar otro, el segundo se desarrolla siempre a imagen del primero. De una a otra generación se repiten incesantemente todos los procesos del desarrollo, de la división y la diferenciación celulares, de manera que de la célula huevo emerge siempre la misma estructura, el mismo sistema. El plan de organización revelado por la anatomía comparada presupone la existencia de un plan de desarrollo que dirige la multiplicación de las células en el huevo, su diferenciación, su disposición. Si el plan es válido, si se ejecuta como es debido, el hijo se constituye normalmente a imagen de los padres. Si el plan es defectuoso o se ejecuta mal aparecen deformidades. La biología vuelve a enfrentarse así

[236] *Cellularpathologie*, pág. 25.

con el problema planteado por Maupertuis y Buffon: una organización constituida por un conjunto de unidades elementales exige para su reproducción la transmisión de una «memoria» de generación en generación. Durante la primera mitad del siglo XIX la cuestión de la fidelidad de la reproducción se solventa apelando a un «movimiento vital». Pero sean cuales sean el nombre y la naturaleza de las fuerzas encargadas de transmitir la organización de padres a hijos, está claro que, de aquí en adelante, deberán situarse en la célula.

Al sustituir la estructura visible por la organización como objeto de análisis, se introduce en el estudio de los seres vivos un sistema de referencia para los datos inmediatos de la percepción. Si para el siglo XIX la vida se identifica con la organización, es porque constituye un centro de articulación entre tres variables estrechamente dependientes entre sí: la estructura, la función y lo que Auguste Comte llama «el medio». La vida sólo existe en la medida en que los valores de estos tres parámetros están en armonía. Toda variación de uno influye en el conjunto del organismo, que reacciona modificando los otros. En un medio determinado, dice Comte, «dado el órgano, se encuentra la función y recíprocamente»[237]. El análisis del funcionamiento y las propiedades de los sistemas vivos descansará a partir de entonces en esta interacción. Hacer biología consiste en estudiar las variaciones de ciertos parámetros en respuesta al cambio, natural o provocado, de otro parámetro. De ahora en adelante, todos los esfuerzos de los biólogos, todo su ingenio y sus iniciativas, se encaminan a encontrar la manera de aislar una de las variables, inventar una técnica para perturbarla de manera calculada y medir los efectos sobre las demás variables. Todos los problemas biológicos tendrán en lo sucesivo al menos tres aspectos.

La articulación entre estructura, función y medio remodela totalmente la disposición espacial de los seres. La remodelación afecta primero al espacio en el que se reparte el conjunto del mundo vivo, ya que, en materia de organización, no todas las combinaciones de elementos son posibles. Sólo pueden sobrevivir las disposiciones que satisfacen las condiciones de existencia. Sólo pueden reproducirse aquellos que están adap-

[237] *Cours de Philosophie positive;* Oeuvres, III, París, 1838, pág. 237.

tados al medio. En lugar de una cadena ininterrumpida de un extremo a otro del mundo vivo, no se encuentran más que unos cuantos grandes tipos de organización, masas aisladas entre sí. La continuidad de lo viviente ya no es horizontal en el conjunto de los seres, sino vertical en la serie de generaciones unidas por la reproducción.

Se produce también una gran remodelación en el espacio en el que se sitúa el propio ser vivo, ya que, en las raras combinaciones posibles, los órganos no se asocian al azar, sino que se disponen según un plan preciso. Los órganos esenciales están hundidos en lo más profundo del organismo. Los accesorios se despliegan en la superficie. Lo importante, lo que está en la base misma de la vida y que, como tal, no puede cambiar sin consecuencias dramáticas para la existencia del animal, se ve de este modo privado de cualquier relación con el medio ambiente, está al abrigo de cualquier influencia externa. Lo secundario, en cambio, está en contacto directo con el medio y sufre todas sus influencias. Dado que puede variar, si no con entera libertad, sí por lo menos en gran medida, es la sede de todas las interacciones entre el organismo y su medio. Es en la superficie, en esa envoltura que une y separa al mismo tiempo al organismo y su medio, donde las influencias externas ejercen de manera más o menos directa y duradera su acción sobre el ser vivo.

Incluso el espacio ocupado por la sustancia constitutiva de los seres vivos se modifica, ya que éstos se componen siempre de células. La continuidad de la fibra y del tejido se sustituye por la naturaleza discontinua de las estructuras celulares. Los cuerpos vivos ya no están formados por tramas sólidamente tejidas, por capas estrechamente superpuestas, sino que se presentan como reuniones de elementos, conglomerados de unidades. Con la teoría celular, la biología descansa sobre una nueva base, ya que la unidad del mundo vivo ya no se fundamenta en la esencia de los seres vivos, sino en una comunidad de materiales, de composición y de reproducción. La cualidad particular de lo viviente viene dada por su organización fina. Pero, al mismo tiempo, la teoría celular acerca el mundo viviente al mundo inanimado, ya que ambos se construyen sobre un mismo principio: la diversidad y la complejidad son el resultado de una combinatoria de elementos simples. La célula se convierte en un «centro de crecimiento», del mismo modo que el átomo representa un «centro de fuerzas».

Finalmente, la última remodelación afecta al espacio que une entre sí las generaciones sucesivas, puesto que la organización no nace ya acabada del líquido seminal, sino que se elabora paso a paso a partir de una célula simple que se desprende del cuerpo de los genitores. En el curso del desarrollo embrionario, el crecimiento del huevo engendra una secuencia de organizaciones distintas de las que sólo la última corresponde a la del individuo adulto. La reproducción no se basa ya en la persistencia de ciertas estructuras dadas de una vez para siempre, sino en ciclos de organizaciones sucesivas que unen tanto el huevo a la gallina como la gallina al huevo.

El espacio así remodelado viene a articularse con el tiempo. Dado que no se trata ya de explicar la simple asociación de cierto número de elementos, sino su organización, en el siglo XIX el problema de su génesis se plantea en nuevos términos. Lo que liga las organizaciones no es la vecindad en el espacio, ni esta ligazón se realiza por la acumulación de elementos idénticos o semejantes. Las relaciones entre estos elementos vienen determinadas por la sucesión en el tiempo. Si dos sistemas organizados presentan ciertas analogías, es porque ambos han pasado por una etapa común en la serie de las sucesiones. A la idea de organización se une indisolublemente la idea de su historia. Sin embargo, la historia de un sistema organizado no representa simplemente la relación de eventos en los que el sistema se ha visto implicado. La historia se convierte en la serie de transformaciones mediante las cuales se ha constituido progresivamente el sistema. Así pues, ya no es necesario que se asegure la permanencia de la estructura primaria generación tras generación, porque las mismas organizaciones pueden derivarse las unas de las otras por una serie de reorganizaciones sucesivas, es decir, por una misma «evolución». Existe, en efecto, una correlación entre el espacio y el tiempo en el curso del desarrollo embrionario. Los órganos ni se distribuyen al azar en el individuo ni se forman en cualquier orden. Los más importantes son los que están más profundamente hundidos en el corazón del organismo, que también son los que sufren menos modificaciones y los que se forman en primer lugar. Los órganos accesorios, en cambio, se distribuyen en la superficie, varían con facilidad y son los últimos en formarse. Así pues, al plan de organización espacial corresponde un plan de organización temporal. La serie de transformaciones que constituye la ontogéne-

sis bosqueja entonces una nueva relación entre las especies de un mismo grupo, ya que en todos los embriones del grupo aparecen en primer lugar los mismos órganos, es decir, los más importantes y más ocultos, como si constituyesen un mismo fondo de organización. Sólo en una fase posterior los embriones del grupo empiezan a diferenciarse como si, una vez comprometidos en la misma vía, las diferentes especies se detuviesen en lugares distintos, con las más perfectas prosiguiendo durante más tiempo su camino para completar los detalles superficiales. Tras el tiempo de la ontogénesis se distingue confusamente otro tiempo, más remoto, más poderoso, a través del cual parece perfilarse todo un haz de relaciones entre los seres vivos. Es ahora cuando se hace posible una teoría de la evolución.

# 3. El tiempo

El tiempo representa hoy para el biólogo mucho más que un simple parámetro físico, porque es indisociable de la génesis misma del mundo vivo y de su evolución. No hay en este planeta ningún organismo, ni siquiera el más insignificante o el más rudimentario, que no constituya el punto final de una serie de seres que han vivido a lo largo de dos mil millones de años o incluso más. Cada animal, cada planta, cada microbio, es un simple eslabón dentro de una cadena de formas cambiantes. Todo ser vivo es el resultado inevitable de una historia que representa no sólo la sucesión de eventos en los que se han visto implicados sus predecesores, sino también la sucesión de transformaciones que han conducido progresivamente a esa forma de vida. A la idea del tiempo están indisolublemente ligadas nociones como la de origen, continuidad, inestabilidad y contingencia. Origen, puesto que se considera que la aparición de la vida es un acontecimiento extraordinario acaecido seguramente una sola vez desde la formación de la Tierra. Todos los seres vivos actuales descienden, pues, de un único antepasado común o, como mucho, de un número muy reducido de formas primitivas. Continuidad, puesto que se considera que, desde la aparición del primer organismo, lo viviente sólo puede nacer de lo viviente: el hecho de que la Tierra esté hoy poblada por organismos muy diversos se explica por las reproducciones sucesivas. Inestabilidad, puesto que, si bien la fidelidad de la reproducción conduce casi siempre a la formación de lo idéntico, de vez en cuando da origen a seres distintos: por estrecho que sea este margen de error, es suficiente para asegurar la variación necesaria para la evolución. Contingencia, puesto que no se vislumbra en la naturaleza ninguna intención de ningún tipo, ninguna acción concertada del medio sobre la herencia, capaz de orientar la variación en un sentido premeditado: no hay, por lo tanto, ninguna necesidad a priori de que exista un mundo vivo como el que conocemos. Todo organismo, cualquiera que sea, se encuentra así indisolublemente ligado al espacio que lo rodea y al tiempo que lo ha conducido hasta lo que es y le confiere algo así como una cuarta dimensión.

El estado actual del mundo vivo se justifica hoy por la evolución. Pero el papel asignado al pasado es una consecuencia de cómo se considera y se interpreta el presente. El peso y la acción que una época atribuye al tiempo dependen así de la representación de las cosas y de los seres en esa época, de las relaciones que descubre, del espacio en que las sitúa. No resulta exagerado afirmar que, hasta el siglo XVIII, los seres vivos no tienen historia. La generación de un ser equivale siempre a una creación, tanto si es un acto aislado, que requiere la intervención concomitante de alguna fuerza divina, como si se ha realizado en serie junto con la de todos los seres que verán la luz en el transcurso de los tiempos. Aun cuando la especie se defina con más rigor, se la considera un marco de referencia fijo en el que se suceden los individuos. Las mismas figuras se encuentran siempre en los mismos lugares a través de las generaciones. El marco es invariable, perpetuamente idéntico a sí mismo. ¿Qué historia puede tener un ser preformado mientras espera en las costillas de sus antepasados sucesivos el momento de ver la luz?

## Los cataclismos

El tiempo se introduce en el mundo vivo a lo largo del siglo XVIII. En primer lugar, porque la idea de reproducción da a los seres un pasado: es decir, cada ser forma parte de una cadena anterior formada por los padres, los abuelos y toda la filiación monótona por la cual se perpetúa la especie. En segundo lugar, porque los textos de Burnet, de Woodward, de Benoit de Maillet y, sobre todo, de Buffon ponen de manifiesto la existencia de una serie de cataclismos que han conmovido el mundo que habitan los seres. La Tierra ya no es algo que ha permanecido estático desde la creación: de pronto tiene una historia, una edad, unas épocas. En el siglo XVII la sucesión de las generaciones representa todavía una serie aburrida de producciones idénticas, una trayectoria sin altibajos y sin rupturas, pero la historia de la Tierra, por el contrario, aparece como una sucesión de catástrofes, una multitud de transformaciones distribuidas en largos periodos. Esta historia ya no concuerda con los textos bíblicos, según los cuales, desde la génesis del mundo, la tranquilidad sólo se había visto alterada por el diluvio. La cronología de las generaciones señala el tiempo propio de los seres vivos; por decirlo de alguna manera,

constituye el tiempo intrínseco. En cambio, el tiempo que imponen los cataclismos planetarios sobre el mundo vivo es exterior a los propios organismos. Estos sólo se ven afectados secundariamente, en la medida en que las vicisitudes de la Tierra alteran su hábitat, su clima, su alimentación. La influencia cataclísmica primaria ha sido el enfriamiento progresivo de una superficie terrestre al principio incandescente; la corteza planetaria, recubierta por una especie de océano universal, se ha plegado y dilatado al emerger los continentes y alzarse las montañas; luego, al desaparecer algunas tierras, han surgido nuevos mares. Así es como han cambiado los climas: al principio cálidos por igual, luego se han enfriado en un sitio y templado en otro. Todos esos acontecimientos han repercutido sobre el mundo vivo y han modificado la distribución de los seres sobre la superficie del globo, más que los seres mismos. La huella dejada por los fósiles da testimonio de su identidad con los organismos actualmente existentes. Así lo afirma Buffon: «En el interior de las tierras, en la cumbre de los montes y en los lugares más alejados del mar, se encuentran conchas, esqueletos de peces, plantas marinas, etc., que se parecen en todo a las conchas, los peces y las plantas que viven actualmente en el mar y que, en efecto, son los mismos animales, las mismas plantas… No se puede poner en duda su perfecto parecido ni la identidad de sus especies»[238]. Dispersadas por el enfriamiento de la Tierra, las especies que en un principio medraron en el calor se vieron obligadas a huir y se reagruparon en la única zona que permanece hoy templada. Las regiones que se enfriaron se fueron poblando de organismos desconocidos en otras partes. En esta empresa perecieron muchas especies. En resumidas cuentas, son las desigualdades de la corteza terrestre, la variedad de climas, la distribución de los océanos y continentes, lo que ha permitido la conservación de las formas de vida que se encuentran hoy sobre la Tierra. Sin esta diversidad geográfica no existiría la vegetación que tenemos ni la riqueza que encontramos en los campos y bosques. «El globo entero», dice Buffon, «estaría cubierto por un mar triste, y a la Tierra no le quedarían más atributos que el de ser un planeta oscuro, abandonado y destinado como mucho a servir de morada de peces»[239].

---

[238] *Théorie de la terre; Oeuvres complètes*, in-16, I, págs. 109-111.

[239] *Ibid.*, II, pág. 2

Hasta entonces no se había cuestionado la inmovilidad y la rigidez del mundo vivo. No se concebía que el cuadro constituido por la serie de las formas vivas hubiera podido ser alguna vez distinto del actual. Pero la atribución de una historia un tanto agitada a la Tierra hace que el mundo vivo tiemble. La base sobre la que descansa este último empieza a tambalearse. Comienza a considerarse la posibilidad de que, en lo que respecta a los seres organizados, no todo sea inmutable, que los seres puedan transformarse y las especies puedan cambiar con el tiempo. En el haber del siglo XVIII suele anotarse el origen del pensamiento transformista. Al fijismo personificado por Linneo se le opone una corriente evolucionista en la que se alinean tanto Benoit de Maillet, Robinet, Charles Bonnet y Diderot como Buffon y Maupertuis. Esta tendencia evolucionista se habría desarrollado durante toda la segunda mitad del siglo XVIII, y el siglo siguiente no habría hecho más que concretar y aplicar los conceptos. Sin embargo, habría que preguntarse sobre el significado preciso de las palabras *transformismo y evolución.*

Es cierto que a mediados del siglo XVIII se manifiesta una nueva actitud en la mayoría de textos: se puede pasar de una forma viva a otra; muchas especies que vivieron en otro tiempo han desaparecido y no han dejado más que huellas difíciles de reconocer y descifrar; nadie puede afirmar que los animales y vegetales actuales se hayan estabilizado para siempre y vayan a permanecer inalterables. No cabe duda de que surge una incertidumbre en lo que respecta al pasado y el futuro de los seres, que se resume muy bien en la frase de Diderot: «El pequeño gusano imperceptible que se mueve en el fango quizá se encamine hacia el estado de animal superior; el animal enorme, que nos espanta por su tamaño, quizá se encamine hacia el estado de gusano, y quizá sea una producción particular y momentánea de este planeta»[240]. El mismo Linneo acaba por entusiasmarse ante la visión de algunas plantas con flores hasta el momento desconocidas y entrevé la posibilidad de una «transmutación» de las especies en virtud de una suerte de hibridación contra natura.

Sin embargo, la idea de transformación no basta por sí sola para definir el transformismo. Lo que caracteriza a este último es la idea de que en los seres mismos hay una fuerza que los conduce, poco a poco, de lo

[240] *Entretien entre d'Alembert et Diderot* en la Pléiade, pág. 907.

simple a lo complejo a través de las vicisitudes de la Tierra. El transformismo es el producto de un equilibrio siempre inestable entre las formas vivas: es un juego de interacciones entre los organismos y su medio; es la dialéctica entre lo semejante y lo distinto en una historia unificada de la naturaleza. En pocas palabras, el transformismo constituye una teoría causal de la aparición de las especies, de su variedad, de su parentesco. Ahora bien, nunca hubo en el siglo XVIII una teoría unitaria de este estilo. El tiempo propio de los seres y el de la Tierra se ignoran mutuamente. Sólo en casos excepcionales se encuentran y se interfieren. Los elementos que el siglo XIX reunirá para constituir un encadenamiento causal de las formas vivas se encuentran todavía dispersos, aislados e independientes. Numerosos textos evocan la posibilidad de una modificación profunda de los seres vivos mediante la cual una especie podría convertirse en otra. La transformación de «peces en aves» es un ejemplo, largamente discutido por Benoit de Maillet, y es obvia la importancia que reviste para toda teoría evolutiva el paso de la vida marina a la vida terrestre. Los peces abandonados por las aguas que se han retirado, dice de Maillet, se habrían visto «obligados a acostumbrarse a vivir en la tierra»[241]. Las pequeñas aletas situadas debajo del vientre, y que les sirven para nadar en el mar, se habrían transformado en patas necesarias para la marcha. El pico y el cuello se habrían alargado. En la piel les habrían crecido barbas que se habrían ido convirtiendo poco a poco en plumón y finalmente en plumas. Asimismo, no hay nada que impida imaginar la transformación de un pez volador, que vuela dentro del agua y algunas veces por el aire, en un ave que vuele siempre por el aire, pero que conserve la forma, el color y las inclinaciones del pez. «La simiente de estos peces, depositada en las marismas, puede haber dado lugar a esa primera transmutación de la especie, por el paso de la estancia marina a la terrestre. Aunque hayan perecido cien millones sin haber podido adquirir el hábito, basta con que dos lo hayan conseguido para dar lugar a la especie.»[242] Es algo que suena familiar a los oídos del siglo XX, habituados durante más de un siglo al pensamiento evolucionista. Pero, una vez admitida la presencia de un océano universal en tiempos remotos, lo que

---

[241] *Telliamed*, tomo 11, La Haya, 1755, pág. 166.

[242] *Ibid.*, pág. 169.

más le importa a de Maillet es establecer una correlación entre la serie continua de los organismos que viven actualmente en el agua y los que viven en tierra. Todos los animales de la tierra tienen su correlato en el agua. No sólo existe un paralelismo entre los peces voladores y las aves. «El león, el caballo, el buey, el cerdo, el lobo, el camello, el gato, el perro, la cobra, el cordero, también tienen su semejante en el mar»[243]. Cada uno de estos animales, que ya existen en el agua, puede en cualquier momento llegar a la tierra e instalarse en ella. Este es el único tipo de transformación considerado en el *Telliamed*. No existe sucesión de variaciones, ni encadenamiento en el tiempo, ni incremento de la complejidad y la perfección de los organismos con la edad de la Tierra.

En otros textos, en cambio, como los de Charles Bonnet o de Robinet, se tiende a reconocer una creciente complejidad en el mundo vivo, una «progresión» de un estado más bien elemental hacia otro más elaborado. Para Robinet, por ejemplo, no existe más que «un solo Ser prototipo de todos los seres»[244]. A nuestros ojos, esta frase puede tener cierto aire transformista. Sin embargo, de hecho el prototipo no es más que una especie de unidad viviente, de molécula orgánica que forma los seres vivos. Para Robinet, en los orígenes sólo era posible un plan único de organización o de «animalidad»: precisamente el que se encuentra realizado en el prototipo. Este último tiene una tendencia natural a desarrollarse, a combinarse para ir formando poco a poco los seres más variados. Con las combinaciones y las variaciones del prototipo aparecen las diversas formas vivas y se constituye la trama continua de los seres. En resumen, todas las posibilidades se realizan y acaban por completar todos los eslabones de la cadena que va de lo más simple, el prototipo, a lo más complejo, el hombre. Así, la cadena se forma, no por el impulso progresivo y por la transición de unas formas a otras, sino por una especie de combinatoria que hoy produce un organismo y mañana otro completamente distinto. En cambio, para Charles Bonnet, los seres vivos se encaminan regular y unitariamente hacia un estado futuro en el cual «serán tan distintos de lo que son ahora como el estado de nuestro globo diferirá

---

[243] *Ibid.*, pág. 171.

[244] *De la Nature*, IV, pág. 17.

de su estado presente»[245]. Sin embargo, todavía no se trata de transformaciones sucesivas que conducen, a través del tiempo, de lo simple a lo complejo; se trata de un desplazamiento general de los seres, de una traslación de todo el mundo vivo a lo largo del eje de los tiempos. Cada especie, aun guardando su puesto en la cadena, alcanzaría así una nueva posición según su grado de perfectibilidad. «El hombre, trasladado entonces a otro lugar, más en armonía con la eminencia de sus facultades, dejará al mono o al elefante el primer lugar que ocupa actualmente entre los animales de nuestro planeta… Las especies más inferiores, como las ostras, los pólipos, etc. serán para las especies más elevadas de esta nueva jerarquía lo que en la jerarquía actual son para el hombre las aves y los cuadrúpedos.»[246] Si a eso se añade que Charles Bonnet era un preformacionista convencido, está claro que esta ascensión en masa de los seres había sido proyectada desde la creación para mejorar deliberadamente los gérmenes encajados los unos en los otros.

Resulta totalmente arbitrario poner estas obras en el mismo plano que las de Buffon y Maupertuis. Sin embargo, incluso en estos últimos no aparecen más que elementos de variación, y nunca una teoría completa que proponga una formación progresiva de las especies. Es en Buffon en el que se manifiesta la importancia de las condiciones de vida, del clima, de la alimentación, mediante las cuales los seres vivos se insertan en los tiempos geológicos. Para él, los organismos no pueden ser independientes del medio que los rodea. Los factores externos actúan de dos maneras. En primer lugar, limitan la fertilidad de los organismos. Existe una estabilidad del mundo viviente que es la resultante de dos fuerzas que operan en sentido contrario.

Dice Buffon: «El curso normal de la naturaleza viva es en general siempre constante, siempre idéntico a sí mismo; su movimiento, siempre regular, gira alrededor de dos puntos inalterables: la fecundidad ilimitada que poseen todas las especies, y los innumerables obstáculos que reducen esta fecundidad a una cantidad determinada y que permite sobrevivir en todo momento al mismo número de individuos, aproximadamente, de

---

[245] *Palingénésie philosophique; Oeuvres*, XV, pág. 192.

[246] *Ibid*., págs. 219-220.

cada especie»[247]. Esto huele a darwinismo. Aquí aparece ya el tema de los límites impuestos a la expansión de los seres vivos, tema que retomará Malthus y, después de él, Darwin y Wallace. Pero en el caso de Buffon se trata más de una compensación que de una competencia. El equilibrio se concibe en función de la armonía que reina necesariamente en la naturaleza, no en términos de poblaciones, sus luchas y sus derivas. Si la fecundidad es una cualidad inherente a los seres vivos, no sirve para hacer que las poblaciones varíen, sino para perpetuar los tipos. Lo que importa es mantener cada especie en un nivel constante. Además, para Buffon los factores externos han tenido otro papel en la estructura del mundo vivo tal como lo conocemos. Porque, si ha habido cambios, éstos no proceden de los propios seres, sino de los efectos que han tenido sobre ellos las condiciones de vida, los movimientos sísmicos, los cataclismos que han eliminado algunas formas vivas. Los factores externos no actúan directamente sobre los seres para transformarlos. Tampoco actúan sobre las poblaciones para desplazar su equilibrio en una cierta dirección. Simplemente permiten que unas formas sobrevivan y otras no. La estructura del mundo vivo no se plantea en términos de poblaciones, sino de tipos. Muchas especies se han modificado «por las grandes vicisitudes de las tierras y de las aguas, por el abandono o el cultivo de la naturaleza, por la larga influencia de un clima que se ha vuelto contrario o favorable, y ya no son lo que eran antaño». Allí donde la temperatura es la misma, en cambio, se encuentran no sólo las mismas especies de plantas, de insectos y de reptiles, «sin que nadie las haya llevado allí», sino también las mismas especies de peces, de cuadrúpedos o de aves «sin que hayan ido allí»[248].

Dado que las mismas causas producen efectos iguales en condiciones semejantes, las moléculas orgánicas se ordenan en disposiciones parecidas para producir formas semejantes. Pero cuando se combinan moléculas orgánicas para formar animales o plantas, lo hacen con la finalidad de producir organismos complicados, que se parecen ya a los que se ven hoy, y no seres rudimentarios. Poco a poco se van realizando todas las

[247] *Du Lièvre; Oeuvres complètes,* XV, in-4, II, pág. 540.

[248] *Supplément à la théorie de la terre, partie hypothétique, Lªmemoria; Oeuvres complètes,* in-4, IX, pág. 424.

combinaciones posibles. La mayoría prospera y de esta forma se van llenando progresivamente todos los espacios posibles, todos los recovecos de la Tierra, todas las capas de agua: poco a poco se constituye la trama continua de los seres que viven sobre el globo. En cambio, ha habido combinaciones que han fracasado y que han originado «esos monstruos por defecto, esos esbozos imperfectos mil veces proyectados, ejecutados por la naturaleza, que sin tener apenas la facultad de existir, no han subsistido más que poco tiempo»[249]. Así pues, esas incompatibilidades defectuosas han desaparecido sin dejar descendencia, barridas como los monstruos de Diderot[250] por la «depuración general del universo». Si la naturaleza intenta realizar todas las posibilidades de la combinatoria de las formas y de los órganos, algunas combinaciones no son viables. «Todo lo que puede ser, es», escribe Buffon, pero no todo puede ser. Los fósiles son un testimonio del pasado de la Tierra; los monstruos, los límites de la naturaleza. El tiempo se convierte entonces en el gran artífice al servicio de esta última. Pero el tiempo mismo «sólo es relativo en lo que respecta a los individuos»[251]. En realidad, pueden existir variaciones que modifiquen en algo la especie. Puede haber ciertas especies como el caballo, la cebra y el asno que pertenecen ciertamente a uña «misma familia» con un «tronco principal» de donde parecen salir «ramas colaterales»[252]. Puede darse incluso un cierto parecido entre todas las formas que respiran; una «base de organización común», por ejemplo, entre el hombre y el caballo. Pero, en definitiva, estas variaciones siempre tienen un límite, ciertos tipos son tan inmutables como el mismo universo, sin lo cual la ciencia no sería posible. Esta base de estabilidad se ve asegurada por la permanencia de los moldes interiores. «La marca de cada especie constituye un tipo en el que los principales rasgos se encuentran grabados con caracteres imborrables y permanentes para siempre»[253]. Recordando los cambios acaecidos sobre la superficie del globo, y haciendo remontar el origen de los animales a una época en la

---

[249] *L'Unau et l'Ai; Oeuvres complètes*, in-4, III, pág. 443.

[250] *Lettres sur les aveugles*, la Pléiade, pág. 871.

[251] *Vue de la Nature, 2." vue; Oeuvres complètes,* in-4, III, pág. 414.

[252] *Dégénération des animaux; Oeuvres complètes*, in-4, IV, pág. 123.

[253] *Vue de la Nature, 2." vue; ibid.*, III, pág. 144.

que los dos continentes no estaban aún separados, y admitiendo que en el nuevo mundo ciertos animales se transformaron en especies nuevas, en suma, haciendo bien las cuentas se pueden reducir las doscientas especies de cuadrúpedos a treinta y ocho familias creadas inicialmente[254]. El origen del mundo vivo actual debe atribuirse entonces a un compromiso entre la variación y la creación.

Vemos así que la actitud de Buffon, por muy renovadora que pueda parecer, no constituye en realidad una verdadera teoría transformista, pues no contempla la formación de lo complejo a partir de lo simple. Nunca se da una progresión de las formas en el transcurso del tiempo. La transformación no reporta ventaja alguna. La variación corresponde a una «degeneración» o «desnaturalización» por la cual los organismos terminan separándose de su tipo original y perdiendo su pureza. Por otra parte, la influencia de la geografía sobre los seres aún está lejos de representar la interacción entre el organismo y su medio. De hecho, no existe todavía un medio en el sentido que tendrá este concepto en el siglo siguiente. No existe esa porción de espacio que se recorta alrededor del organismo y que de alguna manera lo prolonga, actuando sobre él del mismo modo que el organismo actúa sobre el medio. Sólo encontramos regiones de la Tierra que se prestan a la vida de ciertas formas, condiciones de existencia que no pueden soportar todos los organismos, «circunstancias» que modelan los seres, en el sentido de Montesquieu cuando habla del modelado de las instituciones.

Maupertuis se interesa fundamentalmente por la mecánica de la variación. Lo que encontramos en su obra es, en primer término, la idea de cambios internos que se transmiten por herencia, aportando de este modo las variaciones al mundo viviente.

Se trata de modificaciones que surgen en el juego de los elementos que aseguran la continuidad de las especies a través de la reproducción. El origen de estos cambios hereditarios se encuentra en las partículas que se reúnen en cada generación para formar al niño a imagen de sus padres. En el interior de este sistema, las modificaciones que se producen se ajustan a dos modalidades bien diferenciadas. En primer lugar, el exceso o, por el contrario, la escasez de partículas encargadas de formar un ele-

[254] *Dénération des animaux; ibid.*, IV, pág. 144.

mento específico del embrión puede provocar el cambio de dicho elemento. Es el caso de los dedos supernumerarios, e incluso el de los albinos, esos negros-blancos cuyos cabellos se asemejan a la más blanca lana, cuyos ojos demasiado débiles para la claridad diurna sólo se abren en la oscuridad de la noche y que «representan para los hombres lo que para las aves son los murciélagos y los búhos». Estas novedades, una vez aparecidas, se mantienen frecuentemente en las familias saltando a veces algunas generaciones. Las especies más dispares «deberían su origen a algunas producciones fortuitas en las que las partes elementales no habrían conservado el orden que tuvieron en los animales padres y madres; todo margen de error habría producido una nueva especie, y a fuerza de desviaciones sucesivas se habría formado la infinita diversidad de animales que vemos hoy»[255]. Sin embargo, hay otro modo de provocar variaciones: se trata de emparejar individuos de diferentes variedades, pues los rasgos del producto reflejarán entonces los de ambos progenitores. Aquellos que se dedican a satisfacer el gusto de los curiosos son, por así decirlo, creadores de nuevas especies. Vemos aparecer razas de perros, de pájaros, de canarios que no encontrábamos antes en la naturaleza. «En un principio no eran más que individuos fortuitos; la habilidad y las generaciones sucesivas los han transformado en especies»[256]. Con objeto de satisfacer la moda, cada año se inventan especies nuevas de plantas y animales, se corrigen las formas y se varían los colores. Para Maupertuis, al igual que para Darwin un siglo más tarde, aquello que constituye la maestría del cultivador o del criador sirve de modelo para imaginar la producción espontánea de nuevas especies en la naturaleza. En el caso del hombre, por ejemplo, a través de los azares del emparejamiento, vemos aparecer razas enfermas o individuos de presencia excelente, colosos o cojos, bellezas o bizcos. Sin embargo, la atracción y el rechazo que unos y otros inspiran son decisivos para su descendencia, es decir, para el mantenimiento de estos rasgos excepcionales o para su desaparición. El carácter tísico es rápidamente eliminado, mientras que la finura de la pierna, por el contrario, se mejora de generación en generación. Debido a su inclinación por los granaderos de alta estatura, Federico el

[255] *Système de la Nature; Oeuvres,* III, pág. 164. 256.

[256] *Vénus Physique; Oeuvres, II*, pág. 110.

Grande llegó a elevar la talla de su pueblo. A imitación de los criadores debe llegarse entonces a crear nuevos tipos de hombres. «¿Por qué los sultanes hastiados en harenes en los que confinan mujeres de todas las especies conocidas no son capaces de crear nuevas especies?»[257]

De acuerdo con estos dos mecanismos, la combinatoria de las formas visibles de los seres vivos responde a la de las partículas contenidas en las sustancias seminales que intervienen en la reproducción. Anomalías en el aprovisionamiento de partículas o defectos de ensamblaje durante la formación del embrión, dan lugar a todos los seres capaces de sobrevivir. Sin embargo, para Maupertuis, al igual que para Buffon y Diderot, todas las realizaciones no son viables. Entre todas las combinaciones fortuitas que forma la naturaleza, sólo pueden sobrevivir aquellas que poseen «ciertas relaciones de conveniencia»[258]. El azar ha dado vida a una multitud de individuos, pero solamente en un pequeño número de ellos el acuerdo entre los órganos satisface las necesidades del organismo, lo que les ha permitido sobrevivir. En la mayoría, sin embargo, algún desorden de constitución impidió su desarrollo provocándoles la muerte. «Los animales que no tenían boca no podían vivir; los que estaban desprovistos de órganos adecuados para la reproducción no podían perpetuarse; los únicos que han quedado son aquellos en los que se reunían el orden y la conveniencia»[259]. Dentro de esta exuberancia de seres posibles que comportan variaciones infinitamente diversificadas, es la naturaleza quien a fin de cuentas elige.

Lo que caracteriza a Maupertuis es la explotación hasta el límite de un sistema en el que la estructura visible está dirigida por otra de orden superior. Pretende fundamentar tanto la estabilidad de los seres como su variabilidad sobre la reconstrucción de las formas en cada generación a través de la agregación de partículas. Se trata entonces de hacer variar estas partículas, de agruparlas de acuerdo con un número infinito de combinaciones, de modo que engendren todas las disposiciones, todos los tipos, todas las variedades concebibles. Lo no viable y lo viable se forman por igual, pero sólo esto último se conserva después del paso por

---

[257] *Ibid.*, págs. 110-111.

[258] *Essai de cosmologie; Oeuvres*, I, pág. 11.

[259] *Ibid.*

el filtro de la naturaleza. Aun así, el número de variedades que se perpetúan es lo bastante elevado para que el mundo vivo conserve su continuidad, a pesar de que el tiempo sólo tiene un papel modesto en ello. No existe paso progresivo de lo simple a lo complejo ni perfeccionamiento alguno por pequeñas etapas. No hay nada que sugiera la posibilidad de una serie de transformaciones sucesivas por cuya causa se hubiese constituido progresivamente el mundo vivo que conocemos. Lo que Maupertuis busca es estructurar un sistema intrínseco a los seres vivos, y capaz, por el solo poder atribuido a sus unidades constituyentes, de hacer aparecer todas las variedades imaginables, de recorrer todas las posibilidades.

No se puede, en consecuencia, hablar de transformismo a propósito de la segunda mitad del siglo XVIII. Lo que en aquel momento se pretendía era conciliar la representación de un mundo viviente hasta entonces fijo con la revelación de los grandes cambios que habían sacudido la Tierra. A pesar de las ausencias manifiestas en el registro fósil, a pesar de las grandes migraciones, a pesar de los cataclismos que han redistribuido las especies como naipes sobre la superficie del globo, los seres vivos constituyen siempre un todo continuo, asegurado por el juego de las identidades y de las diferencias espaciales, pero no por el de una filiación temporal. Con el concepto de reproducción, apareció una nueva relación entre los seres que conectaba verticalmente a los individuos a través de las generaciones. Pero esta relación solamente se aplica, por el momento, a los organismos pertenecientes a una misma especie o a otras tan similares que la evidencia de su parecido impone su agrupamiento en «familias». Aunque se cuestione la rigidez de las formas a lo largo de las generaciones, la flexibilidad atribuida a los cuerpos vivos sólo abarca los elementos de interés secundario, caracteres ciertamente importantes para la clasificación de los seres, pero no para su configuración: tamaño, longitud de las orejas o de las patas, número de dedos, color de los ojos o del pelo. A grandes rasgos, las especies conservan sus arquitecturas. Todavía no se concibe que el cuadro del mundo vivo haya podido ser radicalmente diferente del actual, que haya podido cambiar con el tiempo, fuera de cuestiones de detalle, pequeños retoques aquí y allá, añadidos que vienen a disimular puntos blancos sobre la tela. Aunque el mundo vivo de hoy no pueda ya identificarse con el de la creación, su génesis no puede aún prescindir de una amplia creación. Para que se consiga la

diversidad de las formas actuales, es imprescindible que en el origen del mundo ya existieran los principales tipos, los grandes temas sobre los que la naturaleza efectuó luego algunas variaciones. En el punto de partida, en el punto cero, tenía que haber ya especies suficientes para formar una escala continua. Todo lo que el tiempo ha hecho es acrecentar el número de escalones y acercarlos. No es cuestión de ordenar las transformaciones que han sufrido los seres vivos en una serie cronológica. La cadencia en la sucesión de las generaciones y los testimonios de los cataclismos ocurridos sobre el globo no se integran para hacer emerger poco a poco la diversidad de los organismos y su complejidad. Aunque los seres vivos comienzan a tener historias, no existe todavía una historia del mundo vivo.

## Las transformaciones

Con el paso del siglo XVIII al XIX y el advenimiento de la biología, se hace posible atribuir al tiempo un papel en la génesis de todos los seres que viven hoy en día. En primer lugar porque, estando lo orgánico radicalmente separado de lo inorgánico, existe entre todos los seres un parentesco conferido por su condición de vivos. En segundo lugar, porque la continuidad de lo viviente, que sólo nace de lo viviente, termina por desbordar el rígido cuadro de la especie. Finalmente, porque las relaciones entre los seres se establecen no ya a partir de sus partes constituyentes, entre sus órganos tomados uno a uno, sino en referencia al sistema de orden superior que representa la organización. El grado de complejidad de los seres, su nivel de perfección, se mide ahora en relación a lo que Lamarck llama las «masas principales» del mundo vivo. Cada una de estas masas posee su propia organización, su «sistema de relaciones» entre estructuras que se degradan paulatinamente, desde los seres más complejos hasta los más simples. Son los órganos los que varían, pero sin paralelismos entre ellos, sin relación directa con la complejidad del organismo. «Tal órgano de tal especie», dice Lamarck, «goza de su más alto grado de perfeccionamiento, mientras que otro órgano que en esta misma especie se encuentra muy empobrecido o muy imperfecto, en otra especie

se encuentra muy perfeccionado»[260]. Toda comparación entre los seres, toda clasificación que no tome como base la organización, está destinada al error y la arbitrariedad. Por el contrario, si se toman en cuenta las masas, se capta inmediatamente la continuidad de la escala de gradaciones que recorre el mundo vivo desde su extremo más simple hasta el más complejo. Dice Lamarck: «Para cada reino de los cuerpos vivos existe una serie única y graduada en la disposición de las masas, en conformidad con la composición creciente de la organización»[261].

Es la organización en su conjunto lo que se convierte en objeto de transformación. Un sistema de relaciones entre los constituyentes de un ser vivo no es necesariamente inmutable, pues puede transformarse en otro sistema de complejidad inmediatamente superior a través de un proceso de sentido único. Resulta entonces posible derivar todos los seres vivos unos de otros, conectarlos en el tiempo a través de un único movimiento debido a una especie de impulso interior que tiende a complicar los cuerpos vivos. Al atribuir a la organización el poder de transformarse, Lamarck pudo llevar a cabo aquello de lo que fue incapaz el siglo XVIII: conectar el conjunto de los seres vivos mediante una historia común que da cuenta de su génesis sucesiva. Para Buffon, la transformación se aplicaba a dominios muy limitados y sólo se efectuaba en el seno de las «familias» de especies. En los orígenes del mundo vivo había una cuarentena de tipos distintos, a partir de los cuales aparecieron las formas nuevas que constituyen el mundo vivo presente. Pero no había nada que uniera estas familias entre sí, ninguna filiación, ningún grado de parentesco. La palabra «desnaturalización», utilizada por Buffon para describir la variación de las especies, evocaba una degradación, una alteración de la pureza de éstas. Para Lamarck, por el contrario, la transformación sólo puede hacerse en el sentido de una adaptación, lo cual equivale a una ganancia de «facultades». En consecuencia, los diferentes tipos de organización no aparecieron simultáneamente, sino de acuerdo con un orden temporal, «porque remontando la escala animal, desde los animales más imperfectos, la organización se compone y aun se complica en su com-

---

[260] *Philosophie zoologique*, I, pág. 122.

[261] *Ibid.*, pág. 124.

posición de una manera extremadamente notable»[262]. El tiempo se constituye en uno de los principales operadores del mundo vivo, pues es el encargado de hacer emerger paulatinamente todas las formas, unas a partir de otras. Más allá de su diversidad, todos los seres de un mismo reino se encuentran ligados por una historia común. Pero, por el momento, ésta se representa mediante una simple línea recta, sin rupturas ni meandros.

En la visión de Lamarck son tres los factores que cooperan para otorgar al tiempo su papel creador: la sucesión, la duración y el perfeccionamiento de la organización. En primer lugar, todo demuestra que el conjunto de las formas vivas no ha podido constituirse al mismo tiempo. Cada uno de los cuerpos vivos ha sufrido cambios más o menos grandes en el estado de sus órganos y en sus relaciones mutuas. En consecuencia, la especie no puede constituir un cuadro rígido formado de una vez para siempre y donde vienen a instalarse los individuos de las generaciones sucesivas.

«Lo que se llama especie… sólo tiene una permanencia relativa en su estado, que no puede ser tan antiguo como la naturaleza»[263]. Lo anterior es aplicable no sólo a ciertas ramas surgidas de algunos troncos que se toman como base, sino al conjunto de los seres. Ya no hay necesidad de creación. «Todos los cuerpos organizados constituyen verdaderas producciones de la naturaleza, la cual los ha realizado sucesivamente»[264]. A caballo de un mismo movimiento continuo en el tiempo, todas las formas vivas fueron emergiendo progresivamente a través de una serie única de transformaciones sucesivas. Entre una etapa de transformación y el intervalo visible que separa dos niveles de organización próximos existe una relación biunívoca. Si puede establecerse una relación espacial entre los tipos de organización, también puede establecerse una relación temporal entre las transformaciones, y la primera se deriva de la segunda.

Para que esta serie de transformaciones haya podido efectuarse, tiene que haberse desarrollado a lo largo de periodos de tiempo muy largos. Todo lo que se encuentra sobre la superficie del globo cambia progresi-

[262] *Ibid.*, págs. 2-3.

[263] *Ibid.*, pág. 83.

[264] *Ibid.*, págs. 81-82.

vamente de forma y estado. Todos los cuerpos de este planeta sufren «mutaciones»[265]más o menos rápidas de acuerdo con su naturaleza y según las fuerzas ejercidas sobre ellos. La estabilidad que ve el hombre en la naturaleza es sólo aparente. La razón de esto es que el ser humano tiende a referir todos los eventos a la duración de su propia vida, de manera que unos cuantos miles de años le parecen un periodo inmenso, cuando en realidad no permiten contemplar más que estados estacionarios, intervalos entre los cambios que afectan al mundo vivo. Sin embargo, aunque las modificaciones que sufren los seres nos resulten imperceptibles, aunque las formas que encontramos en el Egipto de hoy no se diferencien en nada de las que vivían hace tres mil años, la lentitud del proceso de transformación es compensada por su enorme duración. Para que pueda nacer toda la diversidad del mundo vivo a partir de eventos tan lentos, es necesario y suficiente que se acumule el tiempo. «En comparación con las duraciones que se nos antojan grandes en nuestros cálculos ordinarios, sin duda fue necesario un tiempo enorme y una variación considerable de las circunstancias que se han sucedido, para que la naturaleza haya podido llevar la organización animal al grado de complicación y desarrollo que observamos»[266].

Para Lamarck, la transformación es un proceso de un solo sentido. La variación va siempre de lo simple a lo complejo, de lo rudimentario a lo elaborado, de lo menos perfecto a lo más perfecto. Todo cambio de un ser que lo transforma en otro ser implica necesariamente el crecimiento de la organización, una aptitud mayor para satisfacer una necesidad concreta, una mayor capacidad de respuesta a las exigencias vitales. Todas las transformaciones son exitosas, no hay fracasos que se traduzcan en «especies perdidas». Muchos de los fósiles que se hallan se asemejan a las formas actuales. Cuando no es así, es el hombre el culpable de la destrucción de tales formas, o bien se han modificado hasta hacerse irreconocibles… En el mundo vivo nada desaparece. Las especies más antiguas persisten al lado de las más recientes, lo más simple coexiste con lo más complejo. Hay entonces una base común para los tres parámetros que podemos distinguir en el mundo vivo: el momento de la aparición de

[265] *Ibid.*, pág. 231.

[266] *Ibid.*, pág. 103.

un ser, su grado de complejidad y su nivel de perfección. El conocimiento de uno de ellos permite deducir los otros dos, puesto que representan tres expresiones del orden seguido por la naturaleza en la producción de cada uno de los reinos, animal o vegetal. «Si bien es cierto que todos los cuerpos vivos constituyen productos de la naturaleza, no puede negarse que ésta los ha producido de manera sucesiva y no todos a la vez en un tiempo sin duración; pero si la naturaleza los ha formado sucesivamente, cabe pensar que ha comenzado por los más simples, dejando para el final las organizaciones más complejas»[267]. En consecuencia, menos perfeccionado significa también menos complejo y anterior. He aquí la relación que permite la transformación de la serie de organizaciones en el espacio en una serie isomorfa de transformaciones en el tiempo. Recorrer la cadena continua de los seres, del más simple al más complejo, equivale exactamente a seguir la marcha de la naturaleza a través del tiempo, a reconstruir la sucesión de transformaciones que ha originado las distintas formas de vida. En la escala de los seres, las formas más rudimentarias pasan entonces a ocupar un lugar privilegiado, pues en ellas dio comienzo la organización. En consecuencia, es en los organismos más simples, en los «animales sin vértebras», donde pueden discernirse con mayor claridad las variaciones y analizarse más fácilmente las exigencias de la organización[268].

En el momento de su aparición, la *Philosophie zoologique* fue bastante mal recibida. La influencia de Lamarck sobre sus contemporáneos no se debe tanto al hecho de haber propuesto una explicación de la génesis del mundo vivo a través de transformaciones sucesivas de los seres como al hecho de haber descubierto en lo viviente una unidad que trasciende la diversidad, de haber trazado la frontera entre lo orgánico y lo inorgánico, y de haber centrado el análisis de los cuerpos vivos en su organización; su influencia se debe, en suma, a su contribución decisiva al establecimiento de la biología. Los textos de Lamarck, en el segundo periodo de su actividad, representan una transición entre dos formas del saber. Mientras que algunos ya expresan la actitud propia del siglo XIX, otros se enmarcan todavía en el siglo XVIII. Así, el conjunto de los seres vivos

---

[267] *Ibid.*, pág. 268.

[268] *Ibid.*, pág. 29.

forma una trama continua, la vieja cadena que se despliega de un extremo a otro del mundo vivo. Para Lamarck, al igual que para Buffon, ni la especie ni el género existen verdaderamente en la naturaleza. Sólo hay individuos, o «formas vecinas, variedades y formas que se confunden unas con otras». Si se encuentran hiatos en la gradación, es porque las circunstancias exteriores, las anomalías en el modo de vida, los cambios de hábitos, han perturbado la regularidad de la progresión, o quizá porque nuestro conocimiento incompleto no ha reconocido todos los eslabones de la cadena. La falla que parece separar las aves de los mamíferos comienza ya a colmarse, pues se ha descubierto la existencia de animales intermedios, como el ornitorrinco y el equidna. De hecho, es porque Lamarck sigue viendo una serie lineal en el mundo vivo por lo que puede ver en él el resultado de una serie cronológica de eventos. Es porque la naturaleza no da saltos por lo que las relaciones de vecindad pueden conectarse con las de descendencia. «La naturaleza sigue un orden fácil de reconocer, porque es exactamente el inverso del que observamos al recorrer los seres desde el más perfecto hasta el más simple».

Se trata todavía de la actitud del siglo XVIII en cuanto a lo inevitable del mundo vivo en su forma actual. Es cierto que el cuadro de los seres no ha permanecido idéntico a sí mismo en el transcurso de los tiempos. La cadena no estaba completa en los orígenes del mundo. El tiempo aporta novedades agregando eslabones, uno a uno y poco a poco. Pero, a fin de cuentas, el cuadro que vemos hoy apenas podía ser diferente de lo que es. Negándose en redondo a ver en el mundo vivo el resultado de una intención, la realización de una meta por una potencia suprema, Lamarck atribuye a la vida animal una «causa primera y predominante» que le otorga el poder de complicar y perfeccionar gradualmente la organización. Gracias a esta causa, las operaciones de la naturaleza se desarrollan de acuerdo con un «plan» que adecúa la formación de nuevos seres al estado del mundo en que deben vivir. Antes de producir un ser, la naturaleza sabe de antemano lo que debe producir. Por ejemplo, en cuanto a los vertebrados, es evidente que «la naturaleza comenzó la ejecución de su plan con los peces; que avanzó luego más con los reptiles; que con las aves alcanzó un grado de perfeccionamiento aún mayor, y que con los mamíferos más perfectos ha llegado a su culminación»[269]. Paso a paso,

[269] *Ibid.*, pág. 168.

etapa por etapa, sin errores ni fracasos, la naturaleza crea, progresa, modifica las formas de los cuerpos vivos para alcanzar su objetivo, el más alto grado de perfeccionamiento. El mejoramiento de un sistema requiere a veces toda una serie de intermediarios. Para dar al problema de la respiración la solución más adecuada, la naturaleza debe poner a punto primero un sistema traqueal, luego otro branquial, antes de realizar el sistema más elaborado: el pulmón. Jamás hay tanteos, dudas o incursiones en callejones sin salida. Todo lo que puede suceder es que se presenten retrasos o complicaciones cuando la progresión se ve «contrariada» por los cambios externos o por las circunstancias.

Para realizar sus transformaciones, la naturaleza dispone de la combinación de dos factores: uno intrínseco de lo viviente y otro extrínseco. En todos los seres hay una especie de fuerza que «tiende sin cesar a componer la organización». No se trata en este caso del mecanismo de la reproducción, como pretendía Maupertuis, ni el impulso irresistible que entraña la multiplicación exponencial de los seres, invocado por Benjamin Franklin y Malthus. Se trata de otra fuerza, de origen un poco misterioso, un «poder» que, a pesar de la profesión de fe materialista de Lamarck, recuerda la fuerza vital, atributo exclusivo de los seres organizados y que constituye la verdadera fuente de la armonía y la regularidad en la progresión de los seres. Pero si dicha fuerza tiene por efecto el incremento incesante de la organización, no basta por sí sola para causar la diversidad observada de los seres. Es evidente, por ejemplo, que si todos los peces «hubieran vivido siempre en el mismo clima, en el mismo tipo de agua, a igual profundidad, etc., se hubiera encontrado indudablemente en la organización de estos animales una gradación regular y aun matizada»[270]. ¡Pero quizá nunca habrían salido del agua para poblar los continentes! Para que las formas vivas se diversifiquen deben intervenir las condiciones de vida, las «circunstancias», los «medios ambientes»; pero no como proponían Maupertuis, Buffon y Diderot, para quienes las condiciones exteriores sólo favorecían o contrariaban la perpetuación de seres ya existentes, sino a través de una acción directa de las circunstancias sobre las propiedades de los seres, sobre su estructura, sobre su herencia. Para hacer salir a los animales del agua es necesario «llevarlos a

[270] *Ibid.*, pág. 144.

vivir fuera del agua de manera progresiva, primero a las orillas y luego a las partes secas del globo». Al verse sometidos a nuevas necesidades, adquieren nuevos hábitos y una organización mejor adaptada a la situación. Cabanis ya había sugerido que las necesidades experimentadas, incluso los deseos, desataban la acción y el desarrollo de los instrumentos propios para satisfacerlos, es decir, los órganos. Con Lamarck, se establece toda una red de interacciones entre «el producto de las circunstancias, en tanto causa que lleva a nuevas necesidades, el de las acciones repetidas que crean los hábitos y las inclinaciones, los resultados del mayor o menor uso de tal órgano, los medios que emplea la naturaleza para conservar y perfeccionar todo lo que se ha adquirido en la organización»[271]. Si la facultad de acrecentar la complejidad de las estructuras, inherente a todo ser vivo, es suficiente para asegurar la transformación y la progresión de los seres, son las circunstancias exteriores las que perturban la regularidad y los encaminan hacia nuevas vías.

Esta interferencia, que se produce constantemente entre las facultades mismas de lo viviente y las circunstancias exteriores, deriva de lo que Lamarck considera una de las propiedades más indiscutibles de los seres: la adaptación a sus condiciones de vida, la concordancia entre el organismo y su entorno. La actitud de Lamarck, al igual que la del siglo XVIII, reposa sobre la necesaria armonía del universo. El mundo vivo no es sólo el mejor, sino el único posible. Nunca hay crisis alguna entre los seres y la naturaleza, ni combates por la conquista de un territorio entre los propios seres, ninguna lucha por la existencia como la invocada por Malthus, y que Darwin y Wallace postularán más tarde. Para Lamarck, cuando se produce un nuevo ser que no se ajusta exactamente a la regularidad de la progresión, es para adaptarse a circunstancias particulares. Todas las variaciones que se producen son útiles. Sin embargo, la propiedad que tiene lo viviente de perfeccionar la organización no es siempre suficiente en sí misma. La herencia crea, pero no adapta. Sus nuevas creaciones, sus perfeccionamientos, son regulares, sin fantasías ni desviaciones, sin ninguna capacidad de hacer frente a circunstancias imprevistas. De aquí surge la necesidad de que el medio actúe sobre la herencia a través de los deseos, necesidades, costumbres y actos. Una vez que

[271] *Ibid.*, pág. 28.

la organización de ciertos individuos se ve así modificada, «la generación entre los individuos en cuestión conserva las modificaciones adquiridas»[272]. La plasticidad de las estructuras de lo viviente y la agilidad de sus mecanismos permiten al organismo no su inserción en el mundo que lo rodea, sino la inclusión paulatina de dicho mundo en su herencia.

No es la primera vez que se plantea la posibilidad de una acción directa del medio sobre la herencia. Desde la antigüedad, lo único que parecía justificar la concordancia entre los organismos y la naturaleza era la transmisión hereditaria de la experiencia adquirida por los individuos. Sin embargo, esta idea nunca había sido explotada tan sistemáticamente y con tanto detalle. Ni siquiera con tanta seguridad, pues para Lamarck era evidente que un órgano se pierde cuando deja de ser útil. Las ballenas y las aves no poseen dientes porque no tienen necesidad de ellos. El topo ha perdido la vista porque vive en un mundo de tinieblas. Los moluscos acéfalos carecen de cabeza porque no la necesitan. Es igualmente evidente que un órgano se desarrolla cuando se utiliza con frecuencia. El cuello del cisne es alargado porque le sirve para nutrirse de animales acuáticos. El pato tiene pies palmeados porque bate el agua para nadar. Los carnívoros poseen garras aceradas porque las usan para trepar a los árboles, escarbar la tierra y desgarrar a sus víctimas. La finalidad, en Lamarck, no pone en juego una primera intención, una decisión de producir un mundo vivo y de guiar paso a paso su desarrollo, sino que resulta de una suma de finalidades a corto plazo, por así decirlo, que se centran cada una en el bienestar del nuevo organismo que va a formarse, porque la intención adaptativa *precede* siempre a la realización. A fin de cuentas, el plan que sigue la naturaleza en sus producciones tiene por objetivo enriquecer el mundo con organismos cada vez más complejos, cada vez más perfeccionados, progresivamente más adaptados. Si la progresión natural de los seres no es suficiente para ello, se ve corregida de *antemano*. La ejecución del plan es consecuencia de una serie de pequeñas finalidades acumuladas. Sin embargo, si Lamarck es pródigo en preguntas, es más bien parco en respuestas. Jamás encontramos un análisis, una observación para apoyar su hipótesis y buscar un proceso que permita la acción de las circunstancias sobre la herencia. Tampoco se encuentra ninguna referen-

[272] *Ibid.*, págs. 222-223.

cia a los textos de Haller o de Charles Bonnet que indican la estabilidad de las formas, a pesar de las mutilaciones reiteradas en cada generación. No se sugieren experiencias similares a las propuestas ya por Maupertuis para comprobar si la herencia extrae lecciones de la experiencia vivida. Solamente nos habla de «fluidos internos» que actúan sobre «los constituyentes plásticos del animal» para trazar canales, desplazar masas y construir incluso órganos. En pocas palabras, para modelar poco a poco la forma de los cuerpos. Todavía encontramos en Lamarck restos del viejo mecanicismo cuando habla de la seguridad y la continuidad del movimiento uniforme o uniformemente acelerado.

A fin de cuentas, el transformismo de Lamarck progresa mediante dos tipos de movimiento. En efecto, «es evidente que el estado que observamos de todos los animales es, por una parte, el producto de la complicación creciente de la organización que tiende a formar una gradación regular y, por otra parte, el de las influencias de una multitud de circunstancias muy diferentes, que tienden continuamente a destruir la regularidad en la gradación de la composición creciente de la organización»[273]. Primero tenemos un flujo continuo que avanza sobre la ruta principal, la ascensión que conduce las grandes masas a lo largo de las escalas de la naturaleza, con lentitud, regularidad y seguridad. Luego siguen movimientos locales, perturbaciones que, sin tener grandes consecuencias, introducen «desviaciones», «anomalías» y «digresiones». Finalmente, para alimentar la corriente general, se da un aflujo incesante de organismos muy simples que se forman constantemente a partir de materias inorgánicas. En la base de la escala, la naturaleza procede por «generaciones espontáneas o directas que renueva sin cesar cada vez que las circunstancias le son favorables»[274]. De esta forma produce constantemente «los animálculos de organización más simple», aquellos «de los que sospechamos que apenas están dotados de animalidad». En cuanto se forman, estos organismos se unen al flujo principal y comienzan a ascender en la escala. Así pues, los seres más simples son también los más recientes. En el otro extremo de la jerarquía se encuentra el hombre que, en consecuencia, deriva de los organismos más antiguos. Sin embargo, la

[273] *Ibid.*, págs. 222-223.

[274] *Ibid.*, I, pág. 215; II, pág. 81.

transformación no va más allá; la masa viviente no se acumula en lo alto de la escala. Porque, lejos de aumentar indefinidamente, la población humana sufre una regulación. A medida que el flujo de lo orgánico asciende en la escala, lo que se encuentra arriba retorna al estado inorgánico. Degradándose poco a poco, lo viviente se integra en lo mineral, esperando la ocasión de una generación espontánea para regresar a los primeros peldaños de la escala vegetal o animal y recomenzar su ascensión. Por otra parte, nada excluye que la generación espontánea pueda realizarse a partir de otros medios ubicados en niveles superiores de la escala. Es el caso, por ejemplo, de los «gusanos intestinales», de «ciertos parásitos que originan enfermedades de la piel» o de los «enmohecimientos, hongos y aun líquenes»[275]. Gracias a esta especie de ciclo, el mundo vivo se encuentra en lo que hoy llamaríamos un estado dinámico estable. Nada cambia, pues lo que desaparece es compensado por lo que aparece. Ningún nivel de la escala puede desaparecer, ningún grupo animal puede extinguirse y, si un cataclismo crea un vacío, éste se ve rápidamente colmado por el flujo ascendente, como un agujero en el agua. A medida que los organismos ascienden de jerarquía y dejan vacío su lugar, otros vienen a ocuparlo. En consecuencia, el mundo vivo no puede modificarse y se mantiene de acuerdo con el equilibrio impuesto por los seres, siempre dependiente de una armonía preestablecida. Aun siendo el producto de una serie de transformaciones, el mundo vivo conserva la inmutabilidad de su creación.

Lamarck se sitúa así en el límite exacto entre los siglos XVIII y XIX, y al hacerlo contribuye probablemente más que nadie a esa revisión conceptual que permitió a la biología constituirse en ciencia, separando el mundo de lo viviente del mundo de las cosas inanimadas. Contribuye más que nadie a hacer de la organización el centro del ser vivo, el punto nodal en el que se articulan los elementos de todo ser para asegurar su funcionamiento. Al correlacionar estrechamente la organización con el tiempo, Lamarck se encuentra en condiciones de entrever con más nitidez que sus contemporáneos Goethe o Erasmus Darwin el conjunto del mundo vivo como producto de transformaciones sucesivas, como una progresión de estructuras y de funciones. Sin embargo, por muy novedo-

---

[275] *Ibid.*, I, pág. 214; II, págs, 81-82.

sa que pueda parecer la descripción de un transformismo generalizado, éste se enraíza aún en la representación del mundo vivo que se hacía el siglo XVIII. El transformismo de Lamarck es el encadenamiento lineal de los seres dispuesto en la continuidad lineal del tiempo. La serie de transformaciones sólo se concibe a través del continuo espacial y, por eso mismo, se descarta toda contingencia en la configuración del mundo vivo. Al no encontrar en la *Philosophie zoologique* suficiente rigor en la argumentación y sentido crítico en las observaciones, sus contemporáneos rechazaron la teoría, incluso quienes querían ver un mismo fondo de organización en todos los seres. La mayoría de ellos sólo vio en esta teoría un desarrollo de las ideas de Buffon llevadas al extremo, por no decir al absurdo.

## Los fósiles

Lo que el transformismo de Lamarck tiene en común con el siglo XIX es el movimiento del tiempo, que hace emerger sucesivamente organizaciones cada vez más complejas. Lo que la variedad de órganos tomados individualmente confiere al sistema de sus relaciones es la capacidad creadora. En el siglo XIX, efectivamente, el problema de la génesis se plantea de una forma nueva para los objetos en los que los elementos constituyentes no se encuentran simplemente yuxtapuestos, sino ligados por un haz de relaciones. Estas organizaciones, estas estructuras de orden superior que dirigen la disposición de los elementos en los seres y las cosas, y que otorgan su significado tanto a las partes como al todo, ya no pueden haberse establecido en el origen del mundo, de acuerdo con un orden instituido. Estas organizaciones ya no anteceden a una historia que las habría tomado en la creación para entregarlas a un tiempo capaz únicamente de confundir el orden inicial y de alterar la clasificación. Los sistemas que observamos hoy no han sido creados de una vez para siempre. Por el contrario, fueron constituyéndose en niveles diferentes, a través de etapas sucesivas, gracias a una sucesión de eventos que articulan poco a poco los elementos, que los disponen conforme a ciertas figuras, retocando sin cesar las relaciones para complicarlas. Si ciertos tipos de organizaciones se asemejan, esto ya no sucede en virtud de una pretendida armonía preestablecida más allá del conocimiento

humano, sino debido al hecho de que han atravesado una o más etapas comunes en el proceso de transformación. Para clasificar los seres naturales ya no basta, por lo tanto, con reconocer las similitudes en el espacio; es necesario establecer cuál ha sido la sucesión en el tiempo. El contenido empírico de una determinada área de la realidad no se puede desvelar de golpe, ni siquiera prever en función de alguna idea preconcebida. Este contenido se va precisando en un movimiento continuo según una dialéctica de interacción entre contrarios que engendra la calidad a partir de la cantidad. La finalidad de los objetos que constituyen el mundo reside en su necesidad, que a su vez no puede disociarse ya de la contingencia. La historia deja de ser una cronología de hechos independientes para convertirse en el movimiento en virtud del cual el universo ha llegado a ser lo que es; un proceso de desarrollo, un paso de lo simple a lo complejo; en una palabra, una «evolución» que nace del encadenamiento interno de las transformaciones. Muchas de las relaciones entre las cosas o los seres se invierten, pues es la evolución temporal la que determina las relaciones espaciales. Se trate del espíritu o de la naturaleza, el origen ya no se plantea como un nacimiento a partir del cual se suceden historias que se desarrollan bajo la acción de fuerzas exteriores. El origen se constituye así en el punto de partida de la historia, hacia el cual convergen necesariamente todos los proyectos de organización, y donde se anulan todas las distancias, desigualdades y diferencias.

Lo que separa radicalmente el evolucionismo de Darwin y Wallace de todo el pensamiento anterior es la aplicación a los seres vivos de la noción de contingencia. Hasta el siglo XIX la gran cadena de los organismos participaba de la armonía del universo. El mundo de los seres vivos respondía a la misma necesidad que el de las estrellas. Era inconcebible que los seres vivos hubiesen podido ser alguna vez diferentes de lo que son ahora. Para que esta necesidad llegara a cuestionarse, antes fue necesario que la anatomía comparada, la embriología y la histología trastocaran el espacio de lo viviente. Y esto por varias razones. En primer lugar, una síntesis en el tiempo sólo puede fundamentarse en la representación resultante del análisis espacial. Mientras el mundo vivo se veía como una cadena continua, la sucesión de transformaciones sólo podía contemplarse a la manera lamarckiana, como un proceso de lo simple a lo complejo, que procede de modo lineal a través de una serie de gradaciones. Una vez

rota la continuidad horizontal entre los cuerpos vivos, una vez redistribuidos los seres en grandes «ramificaciones» separadas, la relación vertical ya no puede plantearse como una secuencia única, y esos grupos de seres, aislados unos de otros, no presentan ya ningún carácter de necesidad.

Con la teoría celular, los lazos de unión que se tejen entre los seres vienen a entrecruzarse en una nueva red, tanto en sentido vertical como en sentido horizontal. La célula es, al mismo tiempo, el constituyente universal de todos los cuerpos vivos y lo que une una generación con la siguiente. El desarrollo de cualquier organismo se realiza siempre a través de una serie de transformaciones en la que las células se multiplican, se diferencian y se organizan en una serie de formas. Es frecuente encontrar analogías entre las diversas ontogénesis y, a veces, recorridos comunes. Pero ni el camino elegido por el desarrollo ni la forma en que se disponen las células y se establecen las estructuras, tienen carácter de necesidad.

La repartición de los órganos en un cuerpo vivo lleva también a considerar de manera totalmente nueva la posibilidad misma de variación. El organismo se enrolla alrededor de un núcleo mediante capas superpuestas que se prolongan hacia afuera y se ligan indisolublemente a su entorno. A medida que nos alejamos del centro, disminuye la importancia de los órganos y aumenta la libertad de variación. Las partes superficiales terminan siendo hasta tal punto secundarias que apenas hay restricciones sobre ellas que limiten sus cambios. Para que haya modificación, dice Cuvier, «no es preciso que una forma o condición sean necesarias; parece ser, incluso, que ni siquiera necesita ser útil para realizarse; es suficiente con que sea posible, es decir, que no destruya el equilibrio del sistema»[276]. Ello supone un giro total del planteamiento lamarckiano. La variación de los seres ya no está ligada necesariamente a la noción de utilidad, de necesidad, de progresión; puede ser incluso gratuita.

Finalmente, se modifica la naturaleza de las relaciones que unen al organismo con su entorno. Para Lamarck, los «medios ambientales» eran un parámetro «circunstancial» más. Este parámetro definía la cualidad del elemento en el que está inmerso el organismo: aire, agua dulce o agua

[276] *Leçons d'anatomie comparée*, I, pág. 59.

salada. El animal se encontraba dentro de un medio ambiente, como el resto de cuerpos terrestres. Sin embargo, aún no se reconocía la estrecha relación entre el organismo y su medio. No existía una verdadera interacción: si el medio ejercía a menudo un efecto sobre la estructura del ser, esto se debía a una necesidad o un deseo del organismo, ya fuera respirar, alimentarse o desplazarse, en el aire o en el agua. Con Augusto Comte, sin embargo, los ambientes y las circunstancias se convierten en el medio. Este concepto adquiere así un nuevo significado: ahora representa el conjunto de variables externas a las que se encuentra sometido el ser vivo. Ya no se trata sólo del aire o el agua que envuelven al organismo, sino también de la gravedad, la presión, el movimiento, el color, la luz, la electricidad; en suma, de todo aquello que sea susceptible de ejercer una acción sobre el cuerpo vivo. Pero la relación causa-efecto ya no es en sentido único. El organismo y su medio se influencian mutuamente. Pues, afirma Comte, «según la ley universal de la equivalencia necesaria entre acción y reacción, el sistema ambiente no puede modificar al organismo sin que éste ejerza a su vez una influencia correspondiente sobre el medio»[277]. El organismo no puede disociarse de su medio. Es el conjunto lo que se transforma y modifica.

Ya no puede haber más un tiempo propio de los seres, el de sus generaciones sucesivas, y un tiempo externo, el de las transformaciones sufridas por la corteza terrestre. Para el siglo XVIII era el tiempo de la Tierra, con sus cataclismos, sus variaciones de temperatura, sus perturbaciones de toda clase, el que venía a complicar el orden de los seres sometidos a la monotonía de una reproducción sin historia. Para Lamarck, por el contrario, era el tiempo propio de los seres el que creaba la progresión de lo viviente, mientras que el tiempo de las circunstancias sólo interfería ocasionalmente en el primero para permitir a los seres adaptarse y amoldarse a sus entornos. En el siglo XIX, en cambio, no puede haber más que un tiempo para el conjunto del universo. La historia de los seres se encuentra inextricablemente ligada a la de la Tierra. A partir de entonces los fósiles cambian de papel. En el siglo XVIII lo que contaba era su semejanza con las formas actuales, testimonio de la permanencia de los seres vivos. Para Lamarck eran una prueba de la inestabilidad de lo vi-

[277] *Leçons d'anatomie comparée*, I, pág. 59.

viente y señalaban algunas de sus transformaciones. Para Cuvier, en cambio, constituyen jalones del tiempo geológico, «monumentos de las revoluciones pasadas» que hay que aprender a restaurar y descifrar. No hay más que una historia, la historia de la naturaleza, que unas veces es contada por las piedras y otras por los fósiles, de manera que hay que saber recoger y articular todos los indicios. Los fósiles certifican que el globo no ha tenido siempre la misma envoltura, porque es seguro que debieron vivir en la superficie antes de quedar enterrados en las profundidades. Sin embargo, son las rocas las que revelan la existencia en la corteza terrestre de capas discontinuas en las que se depositan vestigios de seres vivos. Sólo la aplicación de la ley de las correlaciones a los fósiles y la reconstrucción de organismos completos a partir de fragmentos permiten precisar la sucesión de las formaciones geológicas y descubrir los cataclismos que las han engendrado. Por otra parte, a partir del examen de las capas geológicas puede describirse el hábitat de las especies desaparecidas. Si la geología establece el parentesco entre los continentes, los fósiles describen su separación.

Para Cuvier, las capas de rocas distintas, las diferentes agrupaciones de fósiles de un estrato a otro, representan las huellas de las «revoluciones» que han sacudido el globo a intervalos irregulares. Tras estos cataclismos, los animales no podían continuar siendo los mismos. En consecuencia, las rupturas observadas en la continuidad del espacio ocupado por los seres vivos no son sino un reflejo de las rupturas en el tiempo de la Tierra. Puede verse, como señala Cuvier, que «las conchas de las capas antiguas tienen formas que les son propias, y que van desapareciendo gradualmente hasta perderse en las capas más recientes; en estas últimas jamás se encuentran especies análogas a las antiguas, y lo mismo puede decirse de muchos géneros. Por el contrario, las conchas de las capas recientes se parecen a los géneros que viven hoy en nuestros mares»[278]. No hay, pues, nada en común entre lo que vivía en la noche de los tiempos y lo que vive hoy. Al convulsionar la corteza terrestre, los cataclismos han aniquilado los seres que la poblaban. Innumerables formas de vida han desaparecido de esta manera. «Unos, habitantes de la tierra firme, fueron ahogados por los diluvios; otros, que poblaban las aguas, se

[278] *Discours sur les révolutions de la surface du globe*, ed. 1830, pág. 14.

encontraron de repente en seco al elevarse el fondo de los océanos; sus razas han muerto para siempre y de ellas sólo quedan algunos fragmentos apenas reconocibles por el naturalista»[279]. Es un empeño vano buscarlas trazas de una filiación única a todo lo largo del mundo vivo, de una serie de cambios por los que cada especie hubiera nacido de otra mediante una gradación continua. Es impensable conectar lo más simple con lo más complejo a través de una sucesión de variaciones que haya conducido poco a poco al mundo vivo hasta su estado actual. La naturaleza se ha cuidado mucho de impedir la alteración de las especies, de mantener estables las grandes líneas de la organización. Las razas actuales «no pueden ser las modificaciones de las razas perdidas»; las condiciones antaño reinantes en la Tierra no pueden ser las mismas que reinan en el presente. Y si Cuvier no lo afirma de manera explícita, sus discípulos no se recatarán de invocar no ya una creación única, sino varias, una tras cada catástrofe.

La idea de las revoluciones planetarias le valió a Cuvier muchas críticas. A menudo se la ha acusado, incluso hoy, de retrógrada, conservadora, incluso teológica, y de haber retardado el advenimiento del pensamiento evolucionista. Parece claro, sin embargo, que la idea principal del evolucionismo, la contingencia de lo viviente, no podía invocarse mientras los seres viniesen a instalarse ordenadamente dentro de un marco impuesto y marchasen en fila india hacia la perfección. La dispersión de las formas vivas, la existencia de interrupciones temporales en su proceso de formación, el carácter gratuito de la variación, eran tres premisas indispensables para cualquier teoría de la evolución. Las tres son obra de Cuvier.

Correspondió a los geólogos exorcizar el demonio de los cataclismos. La repartición en regiones distintas, la retracción en «islotes» aislados, no se encuentra solamente en el mundo de los seres, sino también en el de las piedras, es decir, en las formaciones geológicas. Pero aquí no es necesario invocar catástrofes excepcionales. Es suficiente recurrir a lo que Lyell llamó el «principio de las causas actuales». Todos los testimonios que guarda la Tierra de su pasado constituyen pruebas de que la superficie ha sufrido una serie de modificaciones. Pero los cambios que

[279] *Ibid.*, pág. 18.

se produjeron en la superficie del globo en el pasado se deben a procesos no diferentes, en cuanto a intensidad y naturaleza, de los que tienen lugar en el presente. Dice Lyell: «Para explicar los fenómenos observados, podemos ahorrarnos el recurso a catástrofes inesperadas, violentas y generales, y considerar las transformaciones pretéritas y las transformaciones actuales… como pertenecientes a una serie uniforme y continua de hechos»[280]. Si sabemos ver en los estratos geológicos los indicios que encierran, hallamos en los tiempos pretéritos las señales de las condiciones climáticas, de la erosión, de las erupciones volcánicas que siguen dándose en el presente. Se pueden observar troncos de árboles en pie, y raíces que penetran aún en la tierra. Sobre la arena y el barro endurecidos de otros tiempos, encontramos ondulaciones similares a las de nuestras playas. Comparando, como hace Lyell, las marcas que las gotas de lluvia han dejado en las rocas de edades diversas, se tiene la impresión de contemplar las huellas que podrían dejar sobre la arena aguaceros que se sucedan con algunos días de diferencia. Las formas y dimensiones de las gotas son casi idénticas y testimonian una analogía en las condiciones atmosféricas. Ni las lluvias, ni las polvaredas, ni los desiertos, ni los hielos, ni los vientos, parecen haber sido diferentes de lo que son hoy día. Todo indica que el relieve de la superficie terrestre ha sido modificado por eventos violentos. Cadenas de montañas se elevaron o se hundieron en las profundidades; hubo valles que se abrieron bruscamente y se rellenaron luego, para ser excavados nuevamente; los mares hicieron retroceder las tierras para volver a retirarse después. Pero todos estos cambios representan una serie de acontecimientos sin rupturas verdaderas, una sucesión de épocas que ha conducido progresivamente a la configuración actual de la corteza terrestre.

Estudiando la disposición de las masas minerales hundidas bajo tierra se llega a reconstruir el orden geológico. Las rocas componen una gran serie cronológica de movimientos que testimonia una sucesión de hechos en la historia primitiva del globo y de los seres que lo han poblado. A pesar de todos los cambios, de la variación de las condiciones, de las circunstancias, del clima global o local, las mismas causas han llevado a la acumulación de los mismos materiales, han dado origen a los mismos

[280] *Principes de géologie*, trad. francesa, 1, pref., París, 1943, págs. 15-16.

estratos geológicos. Todo ha sucedido sin violar las leyes que aún rigen hoy la formación de los suelos, de los sedimentos y de las rocas. La geología, dice Lyell, «consiste en la investigación seria y paciente de las relaciones existentes entre los fenómenos geológicos antiguos y el resultado de los cambios que están produciéndose en el presente, sea bajo nuestra mirada, sea en regiones inaccesibles a la observación, de cuya realidad dan fe los volcanes y los movimientos subterráneos»[281]. Si el pasado ha producido el presente, sólo el presente debe explicar el pasado.

Para clasificar las rocas no basta con examinar la estructura y la textura. Es necesario también referirse a su origen y a su edad para deducir su orden de formación. Para datar una masa mineral hay tres criterios: la superposición, es decir, el lugar relativo que ocupa en relación a las rocas contiguas, con los estratos más antiguos debajo de los más recientes; el carácter mineralógico, que con frecuencia es idéntico para las rocas pertenecientes a estratos horizontales, pero que varía rápidamente en sentido vertical, y, por último, el contenido en restos orgánicos. Su misma naturaleza, dice Lyell, «da a los fósiles el más alto valor como carácter cronológico, confiriendo a cada uno de ellos la autoridad atribuida en la historia a las medallas contemporáneas de ciertos acontecimientos»[282]. En consecuencia, las formaciones más fáciles de datar son precisamente aquellas que encierran la mayor cantidad de fósiles. Se empieza estableciendo una cronología de estas formaciones, para lo cual se intenta, en la medida de lo posible, situar en las mismas divisiones los diferentes grupos de rocas que se descubren. Según su origen y las causas de su formación, las rocas pueden dividirse en cuatro grandes clases: sedimentarias, plutónicas, volcánicas y metamórficas. Sin embargo, estas clases de rocas no forman una serie única en sentido cronológico. Ninguna de ellas corresponde a una época precisa, de manera que no es posible reconstruir la sucesión de las épocas geológicas a partir del simple examen de la disposición vertical de los estratos superpuestos en cierta región. En las rocas se da una especie de «transmutación»: las masas fosilíferas se convierten poco a poco en masas cristalinas. Hoy se siguen formando capas sedimentarias y fosilíferas en lagos y mares, mientras que en otros luga-

---

[281] *Principes de géologie*, 1, pág. 516.

[282] *Manuel de géologie élémentaire*, trad. francesa, París, ed. 1856, pág. 160.

res aparecen formaciones volcánicas. Este proceso viene efectuándose desde tiempos remotos; en todas las épocas del pasado se han formado en la superficie del globo depósitos fosilíferos y rocas ígneas, mientras que ciertas capas sedimentarias sometidas a la acción de la presión y el calor han adquirido una estructura cristalina. En consecuencia, y debido a las diferencias regionales, la posición relativa de las rocas sólo puede confrontarse en áreas limitadas. Así pues, las cuatro grandes clases de rocas deben contemplarse «como cuatro órdenes de monumentos, que están en relación con cuatro series de acontecimientos contemporáneos o casi contemporáneos»[283].

El análisis geológico termina así por descomponer la corteza terrestre en dos series espaciales, una vertical y otra horizontal, que pueden transcribirse en una suerte de cuadro cronológico. En la dimensión horizontal, cada línea del cuadro corresponde a los estratos de minerales y fósiles correspondientes a una misma época; Lyell distingue cuatro, que denomina Eoceno, Mioceno y Plioceno viejo y nuevo. En la dimensión vertical, las cuatro grandes clases de rocas «forman cuatro columnas paralelas o casi paralelas»[284]. Cada cuerpo presente en la corteza terrestre puede entonces caracterizarse mediante dos coordenadas: una que describe la época y la contemporaneidad, y otra que precisa la naturaleza y, en ciertos casos, el modo de formación. El presente corresponde a la línea inferior del cuadro, es la porción que aflora en la superficie del globo. En el otro extremo del cuadro, el correspondiente a los periodos más antiguos, es decir, en las profundidades de la Tierra, ya no se encuentran trazas que sirvan para señalar el comienzo de las series, ya no hay signos que permitan ligar la historia de las edades anteriores con la presencia de seres organizados. Los restos encontrados siempre describen perfiles de una misma historia. El mundo vivo sólo representa un aspecto particular de la Tierra y de su pasado.

## La evolución

[283] *Ibid.*, pág. 153.

[284] *Ibid*.

En la historia de la naturaleza, si los fósiles indican la edad de las rocas, las capas de minerales nos informan de la distribución en el tiempo y en el espacio de las especies que vivieron en épocas pasadas. «El geólogo», dice Lyell, «llega a conocer cuáles son las especies terrestres, de agua dulce y marinas que han coexistido en una época concreta del pasado, y una vez ha identificado las capas que se formaron al mismo tiempo en el fondo de los mares y en el fondo de los lagos interiores, puede ir aún más lejos y probar que ciertos cuadrúpedos o ciertas plantas acuáticas encontradas en estado fósil en las formaciones lacustres habitaron el globo en la misma época en que reptiles, peces y zoófitos habitaban el Océano»[285]. Las transformaciones experimentadas por la superficie terrestre han impedido que las mismas especies hayan podido multiplicarse y persistir a través de toda la historia del globo. Si se considera un plano de estratificación horizontal de la corteza terrestre, los restos orgánicos de un tipo determinado nunca se distribuyen en extensiones interminables, sino en zonas localizadas. Examinando la distribución de las formas de vida actuales en todo el globo, se observa que las superficies habitables de la tierra y del mar están divididas en gran número de regiones diferenciadas o «provincias», cada una de ellas habitada por una combinación particular de animales y vegetales. Igualmente, la geología distribuye los seres de otras épocas en numerosas provincias habitadas cada una de ellas por un conjunto particular de animales y plantas, provincias que hoy se encuentran repartidas en varias regiones y enterradas a distintas profundidades. La sucesión de los seres vivos sobre la Tierra no parece haber respondido a una cadena única de transformaciones, sino más bien a «la introducción ocasional en la Tierra de nuevos grupos de animales y plantas»[286]. Para estar en condiciones de crecer y multiplicarse durante algún tiempo, estos nuevos organismos debían adaptarse a las condiciones de existencia prevalecientes.

Profundizar en la corteza terrestre equivale a retroceder en el tiempo. Según la imagen presentada por Lyell, los archivos geológicos describen una historia del globo incompleta, escrita en un dialecto cambiante y de la cual sólo se habría conservado el último volumen, cuyas páginas se

---

[285] *Ibid.*, pág. 185.

[286] *Ibid.*, pág. 497.

encontrarían en tal estado que sólo sería posible descifrar algunos fragmentos de capítulo o algunas páginas sueltas. Las palabras de este lenguaje, que cambia progresivamente a lo largo de los capítulos, representan de alguna manera las formas que han existido, hoy enterradas en las sucesivas formaciones geológicas, y que parecen entrar bruscamente en escena. Comparando los últimos capítulos, buscando leer en el orden de superposición de los estratos la edad relativa de los fósiles que contienen, surgen nuevas relaciones entre las familias o especies desaparecidas y las actuales. Dice Humboldt: «Todas las observaciones coinciden en que las faunas y las floras fósiles difieren tanto más de las formas vegetales y animales actuales cuanto más profundas son las formaciones en las que se encuentran, es decir, cuanto mayor es su antigüedad»[287]. En el mundo de los seres, como en el de las piedras, el presente corresponde precisamente a la capa más superficial de la corteza terrestre. Por otra parte, es posible establecer relaciones numéricas entre lo que vive y lo que ha vivido. Así, un gran número de especies actuales se asemeja a un pequeño número de especies desaparecidas, como si los lazos de parentesco entre el pasado y el presente pudieran representarse mediante un cono cuya punta se hunde en la profundidad de la corteza terrestre, como si, habiendo partido de un mismo plan de organización, de un tipo único, los cuerpos vivos hubieran tendido a divergir con el tiempo.

Se trata del mismo tipo de relación que la resultante de comparar especies similares, o variedades de la misma especie, que viven en diferentes regiones zoológicas. Porque si la formación del mundo vivo obedeció a causas que siguen operando en el presente, entonces debe ser posible verlas actuar en ciertas condiciones. La obra científica que condujo directamente al desarrollo de una teoría de la evolución comporta dos aspectos: la investigación sobre la distribución de las especies a escala mundial y la síntesis de los factores en juego en la formación de las especies. Con Darwin y Wallace hace su aparición un nuevo tipo de naturalista que ya no es un investigador de museo o de parque zoológico, sino que, como el geólogo, es ante todo un viajero que se desplaza para examinar el material directamente sobre el terreno. El naturalista viaja de isla en isla, de continente en continente, para estudiar los seres vivos en su medio natu-

[287] *Cosmos*, trad. francesa, París, 1855, págs. 316-317.

ral, para comparar las formas, los hábitats y los comportamientos; acumula observaciones, comparaciones y mediciones. No duda en experimentar sobre el terreno sumergiendo caracoles en el mar durante quince días, por ejemplo, para medir su capacidad de supervivencia y determinar en consecuencia sus posibilidades de ser transportados a otras tierras. Gracias a la enorme cantidad de material así recogido, resulta posible analizar el parentesco entre los seres, su variación en función de las condiciones geográficas, su tendencia a propagarse o a desaparecer. Puede verse entonces surgir todo un haz de interacciones a través de las diferencias que imponen a una especie las condiciones geográficas, su aislamiento, las posibilidades de traslado de un lugar a otro por aire o por mar. Se comprueba así que en las islas oceánicas no hay ni batracios ni mamíferos, pero que, con frecuencia, se encuentran especies no existentes en ninguna otra parte, que hay una afinidad notable entre las especies de las islas y las del continente más próximo, sin que, no obstante, sean especies idénticas. Es lo que observó Darwin en el archipiélago de las Galápagos: «Todos los organismos terrestres y acuáticos llevan el sello incuestionable del continente americano: de veintiséis aves terrestres, veintiuna, o quizá veintitrés, se consideran específicamente distintas, como si hubieran sido creadas allí; sin embargo, es evidente la estrecha afinidad que presentan con las aves americanas en todos sus caracteres, hábitos, comportamientos y cantos…; es evidente que las islas Galápagos debieron recibir sus habitantes de América, ya sea por medios de transporte ocasionales, ya por una antigua conexión con la tierra firme»[288]. Se puede decir que cada una de las islas tiene sus propias aves. Pero todas conservan un cierto parecido entre ellas y con las del continente americano, como si las diferencias emergieran de un mismo fondo originario, como si las diversas especies de aves derivaran todas de un antecesor común, siendo su individualización la consecuencia de su aislamiento en territorios geográficos separados.

Así pues, la investigación geográfica y el análisis de los «archivos paleontológicos» llegan a la misma conclusión: con el tiempo, un pequeño número de organismos similares produce gran número de descendientes distintos. Ahora bien, cuanto más se diferencian estos descendientes del

[288] *L'origine des especies*, trad. francesa, París, 1873, pág. 424.

tipo original, mayor es su tendencia a aislarse reproductivamente; en consecuencia, mayor es la posibilidad de que esta diferencia se perpetúe. Para Darwin, las variedades que llegan a diferenciarse mucho unas de otras terminan por ser promovidas al «rango de especie». En resumidas cuentas, la aparición de nuevas especies se rige por dos variables: el tamaño de las poblaciones y la frecuencia de variación individual. Las poblaciones más numerosas son las que más rápidamente crecen; así pues, un grupo grande tiende a crecer cada vez más y, por eso mismo, a presentar caracteres cada vez más diferenciados. En lo que respecta a la variación individual, cuanto más se diversifican los miembros de un grupo en cuanto a morfología, propiedades, hábitos, etc., más posibilidades tiene el grupo de ocupar hábitats variados y adaptarse a ellos. Los grupos más numerosos son también los que tienen una mayor variabilidad interna, y los grupos más variables son también los que tienen más posibilidades de colonizar nuevos hábitats, instalarse en ellos y acabar reemplazando a las variedades más homogéneas. Las novedades surgidas de una especie permiten a ésta una explotación más eficaz de los recursos de su medio ambiente, gracias a una especie de división del trabajo. Dice Darwin: «Esta tendencia de los grupos ya numerosos de entrada a seguir aumentando y a divergir en sus caracteres, unida a la circunstancia casi invariable de una considerable extinción, explica la disposición de las formas vivientes en grupos subordinados entre sí, a su vez subordinados a un pequeño número de clases grandes, que siempre han sido preponderantes»[289].

Todo lo anterior se traduce en las palabras *divergencia, diversificación y dispersión*. Ya no es posible representar la sucesión temporal de las formas vivas mediante un cuadro que contenga una sola columna, ni siquiera varias columnas paralelas correspondientes a series independientes; la única figura válida para la descripción de la diversificación de un grupo es el árbol genealógico. «Del mismo modo que, durante su crecimiento, los brotes producen otros nuevos que a su vez, cuando son vigorosos, brotan en todos los sentidos de las ramas que sobrepasan y ahogan las más débiles de entre ellas, creo que la generación actúa del mismo modo en el gran árbol de la vida, cuyas ramas muertas y rotas están ente-

[289] *L'origine des especies*, pág. 494.

rradas en las capas de la corteza terrestre, mientras que sus magníficas ramificaciones vivientes y renovadas sin cesar cubren su superficie»[290]. La divergencia de los caracteres, unida a la conservación de los rasgos comunes a través de la herencia, permite comprender las afinidades que conectan a todos los miembros de una misma familia o, incluso, de un grupo de nivel superior. En el seno de una familia derivada del mismo antepasado común, pero fraccionada en grupos distintos, se transmiten ciertos caracteres progresivamente modificados. Todas las especies de la familia están así conectadas por «líneas de afinidad desviadas, de longitud variable, que se remontan al pasado a través de gran número de predecesores». Procediendo paso a paso de esta manera, el conjunto del mundo vivo se dispone a lo largo de las ramas de un mismo árbol genealógico. Es así como se hace derivar el conjunto de todos los seres que han vivido en el pasado y que viven en el presente de un pequeño número de antepasados comunes, incluso de uno solo. El origen de los seres, la «aurora de la vida», se difumina en la noche de los tiempos. Podemos intuirlo como el pie del árbol, la punta del cono enterrada en lo más profundo de la corteza terrestre, que se reduce a unos cuantos seres organizados dotados «de la más simple de las configuraciones», y sin ninguna particularidad diferenciadora.

La nitidez de las rupturas que se observan en el mundo vivo se debe a la extinción de las formas intermedias. Todo lo que la extinción ha hecho, dice Darwin, es separar los grupos, sin haber contribuido de ninguna manera a su creación[291]. Si las aves se encuentran tan separadas de los otros vertebrados es porque una gran parte de las formas que las ligaban a los antepasados comunes se han perdido. Entre las formas que ligaban los peces a los anfibios la desaparición ha sido menos completa; en consecuencia, se observa una ruptura menos brutal. A fin de cuentas, sólo unas pocas de las especies más antiguas han podido dejar descendencia. Dado que todos los organismos que provienen de una misma especie inicial se consideran una clase, cada una de las divisiones de los dos grandes reinos, el animal y el vegetal, incluye sólo unas pocas clases. El árbol genealógico teje una red de parentesco entre todos los seres. La

290 *Ibid.*, pág. 148.

291 *Ibid.*, pág. 455.

relación evolutiva entre dos organismos se mide por su grado de parentesco. Según Darwin: «Toda verdadera clasificación es genealógica. La comunidad de descendencia constituye el oculto lazo de unión que siempre han buscado los naturalistas sin tener conciencia de él; ya no se trata de encontrar algún plan desconocido seguido por la creación, o de enunciar proposiciones generales, o de la simple reunión o separación de objetos más o menos similares»[292].

El segundo aspecto fundamental de la teoría de la evolución tiene que ver con los mecanismos responsables de la variación de los seres, de la progresión de su organización y de su adaptación. Los principios son tres. En primer lugar, y de conformidad con lo que había subrayado Lyell, las causas que han regido la evolución de los seres vivos en el pasado no se distinguen de las que actúan hoy. No es necesario invocar fenómenos excepcionales para hacer surgir las diversas formas vivas, ni grandes cambios que habrían entrañado el reemplazo simultáneo de *todos* los seres. Para Darwin, lo que hay es «un notorio paralelismo entre las leyes de la vida en el tiempo y el espacio, pues las leyes que han gobernado la sucesión de las formas en los tiempos pretéritos son las mismas que hoy gobiernan las diferencias entre las diversas regiones»[293]. Todas las formas de vida actuales son descendientes de las que vivieron en otras épocas. Se puede asegurar que la sucesión habitual de generaciones no se ha interrumpido y que, en consecuencia, nunca ha acaecido cataclismo universal alguno que haya transformado el mundo entero. Todos los cambios se han producido de manera gradual y sin saltos bruscos. Nunca aparecen verdaderas novedades, pues en todos los casos se trata de variedades que se diferencian por divergencia y aislamiento. La transformación de una especie en otra sólo representa la suma de los pequeños cambios experimentados por una serie de generaciones sucesivas en curso de adaptación. La evolución progresa «paso a paso» y «jamás puede dar saltos bruscos». En la visión darwiniana, la continuidad de los seres se sustituye por el crecimiento lento, constante e inexorable del árbol genealógico.

---

[292] *Ibid.*, pág. 443.

[293] *Ibid.*, pág. 433.

En segundo lugar, se rechaza definitivamente la idea de necesidad en el mundo vivo, la idea de que exista una armonía que imponga un sistema de relaciones entre los seres. Los documentos paleontológicos, la distribución geográfica de las especies, el desarrollo de los embriones, el fenómeno de la divergencia de caracteres a partir de un antepasado común, la expansión de ciertos grupos y la desaparición de otros, todo sugiere la contingencia de los seres vivos y de su formación. Ningún plan preconcebido, haya sido ejecutado de una sola vez en una creación o a través de transformaciones sucesivas, puede explicar las formas que poblaron o pueblan hoy la Tierra ni su distribución. Jamás se observa, dice Darwin, «la aparición repentina de nuevos órganos que parezcan haber sido especialmente creados con alguna finalidad». La aparición de una nueva forma no tiene un carácter ineluctable, sino que es el resultado de la conjugación de numerosas fuerzas en una cierta época y en cierto lugar. Si las condiciones hubieran sido otras, el mundo vivo sería hoy diferente de lo que es o, quizá, ni siquiera existiría. Al exorcizar el demonio de la necesidad, la teoría de la evolución libera al mundo vivo de toda trascendencia, de todo factor que escape al conocimiento. Ya no hay nada que, por su propia esencia, se oponga al análisis y la experimentación.

Finalmente, lo que a partir de Darwin transforma radicalmente la actitud hacia el mundo vivo es la consideración no ya de los individuos, sino de las poblaciones. Hasta ese momento, lo que se consideraba eran las variaciones que podía experimentar un organismo particular para vislumbrar el tipo de transformaciones que eventualmente podía sufrir. Con Darwin, los avatares y desventuras que puedan afectar a un individuo concreto pierden interés. Es sin duda imposible reconstruir la historia de cada ser vivo que ha vivido sobre la Tierra, pero, aunque pudiera hacerse, tampoco podríamos deducir de ello las leyes de la variación y de la evolución. El objeto de la transformación no es el organismo individual, sino el conjunto de organismos similares que se van sucediendo en el tiempo. A lo largo de todos sus textos, Darwin insiste sin cesar en la abundancia de la producción de seres organizados, en la magnitud de las destrucciones, en la ineficacia de los mecanismos que anteceden la fecundación y la reproducción, ya que, entre millares de células germinales puestas en juego, sólo una llega a cumplir su papel. En resumen, por todas partes se

pone el acento en el inmenso derroche de la naturaleza, a través del cual los eventos menos frecuentes acaban teniendo consecuencias de la máxima importancia. Antes que Boltzmann y Gibbs, Darwin adopta ya el enfoque que impondrá la mecánica estadística, en la segunda mitad del siglo XIX, para estudiar el comportamiento de las unidades que constituyen los cuerpos. Toda la teoría de la evolución se basa en la ley de los grandes números, aunque Darwin no recurre a ningún tratamiento matemático complejo para analizar la variación de las poblaciones; se contenta con la intuición y el sentido común. Para el estudio de las transformaciones, Darwin considera solamente las fluctuaciones que se dan siempre en las poblaciones, lo que en estadística se conoce como las colas de la distribución. Su enfoque es ya el del análisis estadístico, que transformará la ventaja mínima que confiere a algunos un pequeño aumento de sus posibilidades de supervivencia y de reproducción en un mecanismo rígido de consecuencias inevitables. Así pues, la necesidad no ha desaparecido totalmente del mundo vivo; solamente ha cambiado de naturaleza.

El principal impulso transformador de las formas vivas sólo puede residir, por lo tanto, en el proceso mismo que da lugar a poblaciones numerosas, es decir, en el poder de multiplicación propio de los seres vivos. Ya no se trata de un impulso simple, único y continuo que con el tiempo hace aparecer nuevas formas. La aparición de los seres es consecuencia de una larga lucha entre acciones opuestas, la resultante de fuerzas en lucha, la culminación de un conflicto entre el organismo y su entorno. Pero en este asunto es siempre el organismo el que toma la palabra. El medio sólo se limita a responder. Para Darwin no es «razonable» creer que las patas de la oca han llegado a palmearse simplemente a fuerza de golpear el agua; es «absurdo» pensar que las serpientes han perdido sus patas únicamente para reptar mejor. La capacidad que tienen los seres de modificar sus formas, sus propiedades, sus hábitos, es algo inherente al propio ser vivo. Es una de las cualidades por las que los seres se distinguen de las cosas, y se encuentra indisolublemente ligada a la capacidad más característica de los seres vivos: la de reproducirse. Se trata simplemente de la vieja expresión «creced y multiplicaos». Por su misma naturaleza, cada organismo o cada pareja de organismos están dotados de la capacidad de producir descendencia, en número siempre creciente, de generación en generación. Si sobre la Tierra existiera una única especie,

si nada viniese a limitar su expansión, si nada causara su destrucción, entonces dicha especie se multiplicaría indefinidamente en progresión geométrica. Si nada lo frenase, dice Wallace, «incluso el menos prolífico de los animales aumentaría rápidamente de número»[294]. Linneo ya había calculado que si una sola planta y cada uno de sus descendientes produjeran sólo dos semillas al año (y no se conoce ninguna con una fecundidad tan baja), a los veinte años habría más de un millón de individuos. Darwin hace el mismo cálculo para el elefante, conocido por ser, entre todos los animales, el de reproducción más lenta. Admitiendo que no comience a procrear hasta la edad de treinta años, que viva hasta los cien y que genere seis hijos en todo este tiempo, la descendencia de una sola pareja se elevaría a casi diecinueve millones de elefantes al cabo de setecientos cincuenta años. En lo que al hombre se refiere, cuyo número se duplica cada veinticinco años, al cabo de mil años ya no habría sitio sobre la Tierra para que los descendientes de una sola pareja pudieran mantenerse de pie unos junto a otros. Pero en la Tierra no hay una única especie; el mundo vivo está constituido por poblaciones de diferentes organismos que compiten entre sí por el espacio, la comida, la luz; en resumidas cuentas, por su existencia. El efecto del medio se limita a favorecer la multiplicación de unos a expensas de otros. Unas variantes están destinadas a la desaparición y otras a la expansión. Ahora bien, si todas las especies tienen el poder de multiplicarse exponencialmente, si todas poseen la facultad de engendrar otros seres en proporción siempre creciente, sus descendientes son en general casi idénticos al tipo inicial, pero no totalmente. Las variedades participan en la competencia desde su aparición, y ganan o pierden según si la diferencia respecto de sus antecesores favorece o no su propia multiplicación. De ahí la sustitución progresiva de ciertas especies por otras mejor adaptadas para reproducirse en ciertas condiciones. A fin de cuentas, la única fuerza intrínseca en la evolución del mundo vivo es el poder de multiplicación de los seres.

Es evidente el abismo que separa esta teoría de todas las precedentes, con excepción de la obra de Malthus, a quien tanto Darwin como Wallace atribuyen la paternidad de las ideas del equilibrio poblacional y de la

[294] «On the tendency of varieties to depart indefinitely from the original type», en *J. of the Linnean Society*, vol. 3, 1859, pág. 45.

lucha entre dos fuerzas contrarias, una inherente a los seres y otra externa a ellos. Para construir una teoría de la evolución, la biología se inspira en la sociología. Pero ésta se fundaba a su vez en la estabilidad, ya señalada por Buffon, del número de individuos de una especie. «La causa a la que aludo», decía Malthus, «es la tendencia constante que se manifiesta en todos los seres vivos a multiplicarse más de lo que permiten los medios de subsistencia a su alcance… La naturaleza ha repartido con mano liberal los gérmenes de la vida en los dos reinos, pero ha sido avara en cuanto a espacio y alimento»[295]. Para Malthus, el desarrollo de las poblaciones humanas estaba sometido a la acción de dos factores antagónicos: por un lado, la «multiplicación en progresión geométrica» y, por otro, los obstáculos exteriores como las destrucciones, las guerras, las epidemias, los recursos alimentarios limitados; en suma, todas las restricciones susceptibles de limitar la expansión, especialmente el hecho de que los «medios de subsistencia» no pueden crecer en igual medida que la población, sino que, en el mejor de los casos, sólo pueden hacerlo en progresión aritmética. De ello surge un conflicto que, en las sociedades humanas, se traduce por «una lucha por la existencia», en la que Malthus veía tanto la causa como la consecuencia de los cambios sociales que sobrevinieron con la llegada de la era industrial. La teoría de la evolución recogió la idea de Malthus de la lucha por la existencia, pero lo hizo en un sentido un tanto diferente. Por un curioso giro conceptual, la evolución biológica se ha convertido en el paradigma por excelencia de la lucha por la vida, de la victoria de los fuertes sobre los débiles, de los amos sobre los esclavos, para justificar como una exigencia de la naturaleza las desigualdades raciales o sociales, y hasta los peores excesos. Sin embargo, lo que Wallace y especialmente Darwin retuvieron de la doctrina de Malthus fue sobre todo la idea de una oposición entre la capacidad reproductora de los seres y las fuerzas exteriores que la limitan.

Al igual que Maupertuis, es en la selección artificial practicada sobre animales domésticos y plantas cultivadas donde Darwin se esfuerza en encontrar un modelo aplicable a la naturaleza. De hecho, la creación de especies nuevas por los ganaderos y los horticultores resulta de la interacción entre dos clases de eventos: por un lado, la tendencia natural de

[295] *Essai sur le principe de population*, trad. francesa, Ginebra, ed. 1823, págs. 2-3.

los seres vivos a reproducirse y diversificarse; por otro, la selección por parte del criador de aquellas variedades que le interesan especialmente. El criador no puede actuar directamente sobre la variabilidad. Las modificaciones aparecen sólo «ocasionalmente» de manera espontánea, y son, por así decirlo, gratuitas, sin ninguna relación con las necesidades ni las exigencias del organismo. De manera que, dice Darwin, «la posibilidad de aparición [de modificaciones] será tanto mayor cuanto más considerable sea el número de individuos producidos, y la circunstancia de una cría a gran escala será una condición importante para el éxito»[296]. Pero, aunque sea la naturaleza y no el criador quien produce la variabilidad, éste último puede *elegir* entre las variaciones que le brinda la naturaleza para adaptar los animales al objetivo perseguido. Una vez aparece una variación en un individuo, se mantiene por herencia en su descendencia. En consecuencia, las diferencias individuales son suficientes para permitir una acumulación de cambios en la dirección deseada. El hombre puede efectuar una selección, metódica o inconsciente, conservando los individuos de cada generación que prefiera o que le resulten más útiles. Emplazando los organismos en las condiciones adecuadas, seleccionando regularmente las diferencias individuales, con frecuencia lo bastante nimias para pasar inadvertidas al observador sin experiencia, y limitando la reproducción a estos organismos, se llega a modificar cualquier carácter de un animal o de una planta.

Para Darwin, este modelo de selección artificial es enteramente transferible en forma de «selección natural» a los fenómenos de variación y evolución. Así, escribe Darwin, es la «conservación de las diferencias y de las variaciones individuales favorables, y la destrucción de las que son perjudiciales, lo que yo he llamado selección natural o supervivencia del más apto»[297]. Las variaciones que no son útiles ni perjudiciales, al no estar afectadas por la «selección», pueden mantenerse o no. La variabilidad surge espontáneamente en el curso de las generaciones. Tanto en la naturaleza como en la domesticidad, el tamaño de las poblaciones tiene un papel muy importante para que las variaciones tengan oportunidad de aparecer. Aquí es donde interviene el tiempo. La duración en sí no tiene

---

[296] *L'origine des especies*, pág. 39.

[297] *Ibid.*, pág. 85.

influencia alguna sobre la selección natural. «La importancia del tiempo», dice Darwin, «reside en que incrementa las posibilidades de que las variaciones ventajosas aparezcan, se seleccionen, aumenten y se fijen en relación a las modificaciones lentas y graduales de las condiciones exteriores»[298]. Por primera vez, el tiempo se mide en generaciones. La generación representa la unidad más conveniente para estimar las duraciones requeridas para la aparición de nuevas formas a lo largo de los periodos geológicos. En el árbol genealógico trazado por Darwin para representar el mundo vivo, aparece una nueva rama cuando se acumula una cantidad de variación suficiente para determinar una separación bien definida, como las que se consignan en los tratados de zoología sistemática. Así, los intervalos entre dos ramas «pueden representar cada uno de ellos mil o incluso una decena de miles de generaciones»[299].

En lo que se refiere a los procesos de selección que operan en la naturaleza, sus efectos son mucho más amplios que los de la selección artificial. Mientras que el criador sólo puede seleccionar características visibles, en función de sus gustos o sus necesidades, la naturaleza actúa también sobre los órganos internos, sobre la constitución misma de los seres, sobre el conjunto de la organización. «Se puede decir, metafóricamente, que la selección natural está presente en todo momento por todo el universo, escrutando las más mínimas variaciones, rechazando las que son malas, conservando y acumulando las que son buenas, trabajando insensiblemente y sin ruido, en todas partes, siempre que la ocasión se presenta, para mejorar cada ser organizado en relación con su entorno orgánico e inorgánico»[300]. En consecuencia, la lucha por la existencia es, antes que nada, una lucha por la reproducción. La capacidad de los individuos de multiplicarse en unas condiciones de existencia determinadas, de dar origen a una descendencia capaz de ocupar ciertos territorios, es puesta a prueba de manera constante y automática. La selección se opera incluso en los caracteres ligados a la sexualidad: la lucha entre los machos por la posesión de las hembras se traduce en que son los más fuertes o los más astutos los que tienen la descendencia más numerosa. «Siem-

[298] *Ibid.*, pág. 110.

[299] *Ibid.*, pág. 122.

[300] *Ibid.*, pág. 89.

pre que los machos y las hembras de una especie tienen los mismos hábitos generales pero difieren en su estructura, color u ornamentación, sus diferencias se deben esencialmente a la selección sexual; es decir, resultan del hecho de que, durante varias generaciones sucesivas, ciertos individuos machos, habiendo sido dotados de algunas ventajas sobre los demás en relación con sus medios de ataque, de defensa o de atracción, los han transmitido a sus descendientes machos»[301]. Cualquier mínima ventaja que posea un organismo sobre sus competidores de la misma especie hace que la balanza se incline en su favor. Por mínima que sea, cualquier diferencia en la capacidad reproductora es suficiente para romper el equilibrio de una población. Ciertas modificaciones permiten a algunos individuos multiplicarse un poco mejor, un poco más rápido que los demás. Los primeros tienden a aumentar de número, los segundos a desaparecer. Como la mayoría de las variaciones se transmiten hereditariamente, los cambios benéficos se acumulan automáticamente de generación en generación, mientras que los otros son eliminados. «Toda desviación del tipo normal», escribe Wallace, «ejerce algún efecto, por pequeño que sea, sobre la constitución o sobre las propiedades de los individuos… Si una especie produce una variedad que incrementa, aunque sea ligeramente, el poder de preservar la existencia, esta variedad deberá inevitablemente, con el tiempo, adquirir una superioridad numérica.» Hoy como ayer, la evolución conserva, corrige o mejora la adaptación de los animales y las plantas a su medio ambiente. La selección natural actúa a través de la reproducción diferencial.

Hasta mediados del siglo XIX el mundo vivo se representaba como un sistema de regulación externa. Tanto si habían sido fijados desde la creación como si habían progresado a través de una sucesión de eventos, los seres organizados siempre constituían una serie continua de formas. Si se descubrían fallos en la jerarquía, éstos se debían a omisiones, al desconocimiento o a un inventario insuficiente. La presente estructura del mundo vivo era la expresión de una necesidad trascendente. No era concebible que los seres pudieran ser diferentes de lo que son, que la Tierra pudiera estar habitada por otras formas. Con la teoría de la evolución desaparece la idea de una armonía preestablecida que habría im-

[301] *Ibid.*, pág. 94.

puesto a los seres organizados un determinado sistema de relaciones. La necesidad del mundo vivo tal como lo conocemos se sustituye por la contingencia que ya reinaba en el cielo y en las cosas. No sólo el mundo vivo hubiera podido ser totalmente distinto del que vemos hoy, sino que hubiera podido no existir jamás. Los organismos se convierten en simples elementos de un vasto sistema de orden superior que comprende la Tierra y todos los objetos que alberga. La forma de los seres, sus propiedades, sus características, se ven sometidas a la regulación interna de dicho sistema, al juego de las interacciones que coordinan la actividad de los diversos elementos.

Este cambio conceptual no es la simple consecuencia del pensamiento transformista introducido por Buffon y Lamarck. Es el efecto de un cambio en la manera misma de considerar los objetos, el resultado de una actitud radicalmente nueva que aparece a mediados del siglo XIX. El carácter no accidental de esta transformación se demuestra por el hecho de que se presenta de forma independiente y casi simultánea en campos tan alejados entre sí como el análisis de la materia, con Boltzmann y Gibbs, y el de los seres vivos con Darwin, Wallace y, más tarde, Mendel. Existen, en efecto, dos formas de considerar una colección de objetos pertenecientes a una misma clase, sean las moléculas de un gas o los organismos de una misma especie. En principio, se puede contemplar como un conjunto de cuerpos idénticos, de manera que todos los miembros de la colección representarían copias de un mismo modelo. En el mundo vivo la clasificación de las formas reposa sobre la perpetuación de la estructura a través de las generaciones, sobre la permanencia del tipo. No son los objetos mismos lo que importa, sino el tipo de referencia. Sólo el tipo tiene una realidad, y los objetos se limitan a reflejarla. Poco importa que las copias se aparten a veces del modelo. Las desviaciones del tipo de referencia representan un número desdeñable de casos, pequeños errores sin consecuencias. Desde la perspectiva contraria, la misma colección de objetos puede contemplarse como una serie de individuos que nunca son exactamente idénticos. Cada miembro del grupo adquiere así un carácter único. No existe un modelo al cual puedan referirse todos los individuos, sino un retrato robot que se limita a resumir los valores medios de las propiedades individuales. Se trata entonces de conocer la población en su conjunto a través de su distribución. El tipo

medio no es más que una abstracción. Son los individuos, con sus particularidades, sus diferencias, sus variaciones, los únicos que poseen una realidad concreta.

Estas dos formas de considerar la naturaleza y los objetos que la componen son diametralmente opuestas. El paso de la primera a la segunda señala el inicio del pensamiento científico moderno. En el mundo inanimado, la nueva actitud dará lugar a la mecánica estadística. En el mundo vivo es una condición necesaria para llegar a formular una teoría de la evolución. La variación ya no es un problema de individuos, sino de poblaciones, y aunque Darwin no utilice el análisis estadístico tiene una concepción claramente estadística de las poblaciones, en primer lugar porque las variaciones no hacen sino reflejar las variaciones de distribución propias de cualquier sistema y, en segundo lugar, porque la selección determina una lenta ruptura en el equilibrio de las poblaciones a través del azar de las interacciones entre los organismos y sus entornos. Por ese mismo camino desaparecen las dificultades que se habían presentado hasta entonces para justificar las transformaciones de los seres. No es necesario invocar ningún mecanismo complicado, ningún objetivo misterioso de la naturaleza, ninguna influencia del medio para explicar los cambios morfológicos. Ningún individuo de una especie es idéntico a otro. A cada generación, cada carácter recorre una serie continua de desviaciones alrededor de un valor medio. La adaptación sólo aparece a posteriori, y por el solo hecho de que todo organismo que viene al mundo se ve inmediatamente sometido a la prueba de la vida y la reproducción.

Así pues, lo que caracteriza la teoría de la evolución es la forma de considerar la aparición de los seres vivos y su aptitud para sobrevivir y adaptarse al mundo que los rodea. Para Lamarck, cuando se formaba un nuevo ser su lugar *ya* estaba marcado en la cadena ascendente de los seres, y debía representar *de antemano* un progreso sobre todo lo que había existido hasta entonces. La dirección, si no la intención, precedía a la realización. Con Darwin, el orden relativo entre la aparición de un ser y su adaptación se invierte. La naturaleza se limita a favorecer lo ya existente. La realización es anterior a todo juicio de valor sobre la calidad de lo que se realiza. La reproducción puede originar cualquier modificación. Todas las variaciones son posibles, con independencia de si representan una mejora o una degradación respecto de lo que ya existe. No

hay maniqueísmo de ningún tipo en la forma en que la naturaleza inventa novedades biológicas, ninguna idea de progreso o de regresión, de bien o de mal, de mejor o peor. La variación se efectúa al azar, es decir, en ausencia de todo vínculo entre la causa y el efecto. El nuevo ser no se encuentra confrontado a las condiciones de existencia hasta que ha hecho su aparición. Sólo después de haber venido al mundo son puestos a prueba los candidatos a la reproducción.

Ya en el siglo XVIII, Buffon, Maupertuis y Diderot habían considerado la posibilidad de una criba de los seres organizados tras su formación. Podían formarse monstruos que, incapaces de sobrevivir, debían desaparecer. La naturaleza seleccionaba de algún modo las formas vivas ya formadas, quedándose con aquello que tiene posibilidad de vivir y rechazando lo incompleto, lo que no puede alimentarse por falta de una boca o reproducirse por falta de órganos al efecto. Pero sólo era posible imaginar tales monstruos como producto del juego de las moléculas orgánicas. Podían constituirse todos los posibles a priori de la combinatoria, pero sólo ciertas combinaciones eran viables.

A mediados del siglo XIX el cuadro conceptual cambia totalmente. El equilibrio del mundo vivo se alcanza a través de una especie de dialéctica entre la permanencia y la variación, entre la identidad y la diferencia. A veces se ha criticado el empleo que hace Darwin del término *selección*, pues se asocia con la intencionalidad que lleva al criador a seleccionar de entre su ganado las formas que mejor sirven a sus propósitos. En la naturaleza también se da una selección, pero ésta se realiza de forma automática. Todo aquello que pueda interferir en la reproducción acaba ajustándola de alguna manera. Entre los candidatos a esta reproducción no hay ninguna intención que determine la selección; ésta se realiza después en el banco de pruebas donde lo único que cuentan son las cualidades y la actuación de los individuos considerados. La adaptación es el resultado de un juego sutil entre los organismos y su entorno, pues aunque la capacidad de reproducirse sea una cualidad inherente al organismo, su realización depende estrechamente de todas las variables del medio. El medio «elige» al organismo tanto como el organismo al medio. En la adaptación, el papel de la reproducción es el de un amplificador, limitándose a acentuar las desviaciones que surgen espontáneamente. A fuerza de tirar siempre en el mismo sentido, la reproducción termina encarrilando una

población por vías bien precisas. Las variaciones, producidas a ciegas, se orientan en la dirección que impone la discriminación sin piedad característica de la selección natural. Para Darwin, un ser vivo forma parte desde su nacimiento de ese inmenso sistema organizado que es la Tierra con todo lo que ella implica. La selección natural representa un factor regulador que mantiene la armonía del sistema. Hoy día se considera que un sistema sólo puede perpetuarse en la medida en que bucles retroactivos, o de *feed-back*, vengan a ajustar automáticamente su funcionamiento. La evolución constituye entonces el resultado de la retroacción ejercida por el medio sobre la reproducción.

La selección natural actúa lentamente y por etapas. El tiempo de la evolución es irreversible, a diferencia del tiempo de la física. En efecto, para la mecánica newtoniana no hay ningún sentido temporal privilegiado en la interacción entre dos cuerpos. Será la termodinámica estadística la que en la segunda mitad del siglo introducirá la irreversibilidad del tiempo en la física, haciendo evolucionar las poblaciones moleculares del estado menos probable, o más ordenado, hacia el estado más probable, o desordenado. Con la teoría de la evolución, el tiempo del mundo vivo transcurre en sentido único, pues una vez los seres vivos, por variación y selección, se adentran por una cierta vía, ya no les es posible volver atrás. La selección natural les obliga a proseguir su diferenciación en la dirección tomada o a desaparecer. En las condiciones impuestas por la vida sobre la Tierra, la selección natural, dice Darwin, «tiene por resultado final una mejora siempre creciente del ser en relación con sus condiciones; esta mejora conduce inevitablemente a un progreso gradual en la organización de la mayoría de los seres que viven sobre la superficie del globo»[302]. Para cada etapa de la serie, sólo existe una débil probabilidad de retorno al estado anterior. Sobre este principio puede construirse ya una teoría general de la evolución de los sistemas organizados, vivos o no. El aumento progresivo de su complejidad con el tiempo y la irreversibilidad de las consecuencias de las transformaciones llegan a ser propiedades inherentes a tales sistemas. Lo que suele llamarse progreso o adaptación sólo es el resultado necesario de ese juego de interacciones que se desarrollan inevitablemente entre el sistema y su entorno.

[302] *J. Linnean Soc.*, vol. 3, pág. 45.

A mediados del siglo XIX, las ideas sobre la herencia continúan siendo vagas. Sin embargo, para la teoría de la evolución, lo que es seleccionado se perpetúa por vía hereditaria. Aunque no haya sido formulado por Darwin, este planteamiento está implícito en su teoría. En consecuencia, es la reproducción lo que elabora lo idéntico y lo diferente. Su regularidad hace que los hijos se parezcan a los padres; sus fluctuaciones crean las novedades biológicas. Modificados o no, lo seres nacen, después de lo cual son juzgados por el territorio donde viven y los seres de su entorno, por aquellos que capturan y por aquellos que los capturan, por los de su sexo y por los del otro sexo. La sentencia es inapelable, y se mide por el número de descendientes. La reproducción de los seres vivos se convierte así en el operador principal del mundo vivo, fuente a la vez de la permanencia y de la variación, el proceso a través del cual se mantienen y se diversifican las estructuras, las cualidades y los atributos de los seres. Es el punto de confluencia entre el determinismo que rige la formación de lo semejante y la contingencia que preside la aparición de las novedades. Con la teoría de la evolución, la necesidad cambia a la vez de naturaleza y de propósito en el mundo vivo. Al aplicarse al comportamiento de poblaciones grandes, esta teoría se convierte en lo que el análisis estadístico considerará la expresión de las leyes que rigen los grandes números. Al mismo tiempo, deja de traducir los efectos de una fuerza que escapa al conocimiento, a través de la cual se imponía la configuración del mundo vivo tal como lo conocemos. Mientras las formas vivas se encontraban en su conjunto ligadas por un sistema de relaciones necesarias a priori, había todo un sector del mundo vivo que por su propia esencia escapaba al análisis y la experimentación. Ante este dominio reservado, el biólogo se encontraba un poco en la posición del niño que, con la nariz pegada a los cristales de una pastelería, observa lo que no puede alcanzar. Una vez limitada la necesidad a los efectos exclusivos de una selección que impone la obligación de vivir bajo ciertas condiciones, en determinados territorios y entre ciertos seres, lo inaccesible desaparece. Si no puede atribuirse intencionalidad alguna a la aparición de novedades, su éxito o fracaso en la «lucha por la existencia» depende solamente de factores físicos, es decir, de parámetros modificables. En biología ya no existen zonas vedadas: incluso la reproducción debe convertirse en objeto de análisis.

# 4. El gen

A mediados del siglo XIX se produce un cambio profundo en la práctica de la biología. En efecto, en menos de veinte años aparecen la teoría celular en su versión definitiva, la teoría de la evolución, el análisis de las grandes funciones químicas, el estudio de la herencia, el de las fermentaciones y la síntesis total de los primeros compuestos orgánicos. Con las obras de Virchow, Darwin, Claude Bernard, Mendel, Pasteur y Berthelot quedaron definidos los conceptos, los métodos y los objetos de estudio que están en el origen de la biología moderna y que apenas variarán en el transcurso del siglo siguiente. Reducida hasta entonces a la observación, la biología se convierte en una ciencia experimental. Durante la primera mitad del siglo XX, la organización constituía el dato fundamental que caracterizaba lo viviente. Esta representaba la estructura de segundo orden que mandaba sobre todo lo perceptible en el organismo. Situada en el centro mismo de cada ser vivo, servía de punto de apoyo, de esquema director al que venía a referirse cualquier observación o comparación de la estructura visible de los seres y sus propiedades. En la segunda mitad del siglo, por el contrario, la organización ya no representa el punto de partida del conocimiento de los seres: se convierte en el objeto mismo del conocimiento. Ya no basta sólo con constatar que la organización subyace tras todos los rasgos de un organismo; hay que investigar en qué niveles se fundamenta, cómo se establece y cuáles son las leyes que dirigen su formación y funcionamiento. Este desplazamiento en torno de la organización pone en evidencia todo un conjunto de posibilidades nuevas de análisis. En lo sucesivo, lo que se cuestionará ya no será la vida en tanto que fuerza surgida de la noche de los tiempos, escondida, irreductible e inaccesible a la vez, sino sus componentes, su historia, su origen, la causalidad, el azar, el funcionamiento. Al organismo considerado en su totalidad vienen a añadirse nuevos objetos de análisis: las células, las reacciones, las partículas.

La biología se divide entonces en dos ramas, cada una de las cuales posee técnicas y materiales propios. Una rama estudia el organismo en su totalidad, contemplándolo como una unidad intangible, como elemento

de una población o de una especie. Esta biología, que no tiene contacto con las otras ciencias de la naturaleza, opera con los conceptos de la historia natural. Se puede así describir las costumbres de los animales, su desarrollo, su evolución, las relaciones entre las especies, sin ninguna referencia a la física o la química. La otra rama, por el contrario, busca reducir el organismo a sus constituyentes. La fisiología lo reclama y el siglo lo autoriza. Toda la naturaleza se ha convertido en historia, pero una historia en la que los seres son la prolongación de las cosas y en la que el hombre se sitúa en el mismo plano que el animal. La introducción de la contingencia en el mundo viviente por Darwin y Wallace representa para la biología el «todo está permitido» de Iván Karamazov.

Ya no existen en los seres vivos zonas vedadas ni sectores a las que no pueda acceder el conocimiento. Ya no existe una ley divina que ponga límites a la experimentación. Ante un universo en el que no existe creación y en el que todo es gratuito, la ambición de la biología no tiene límites. Si el mundo vivo marcha a la deriva y no contiene en sí ninguna finalidad, es al hombre a quien le corresponde dominar la naturaleza. Es él quien debe establecer el orden y la unidad que hasta el momento buscaba en la esencia de la vida. Es así como los esfuerzos de la dialéctica y del positivismo intentan reconstruir el puente entre lo orgánico y lo inorgánico, roto a finales del siglo precedente. De la materia a lo viviente no hay una diferencia de naturaleza, sino de complejidad. La célula es a la molécula lo que la molécula al átomo: un nivel superior de integración. Para hacer esta biología no basta ya la sola observación de los seres vivos. Es preciso analizar las reacciones químicas, estudiar las células, desencadenar los fenómenos. Si el organismo debe ser concebido como un todo es porque la regulación de las reacciones, la coordinación de las células y la integración de los fenómenos permiten la posibilidad de una síntesis.

A finales del siglo XIX y principios del XX se individualiza toda una serie de objetos de estudio nuevos. Alrededor de cada uno de ellos se organiza un campo particular de la biología, que de este modo se subdivide progresivamente. El término «biología» llega a abarcar un amplio abanico de disciplinas distintas que se distinguen no solamente por sus fines y sus técnicas, sino por el material y el lenguaje que utilizan. Dos de ellas, surgidas a principios de este siglo, remodelan totalmente la idea

que se tiene de los organismos, de su funcionamiento y de su evolución: son la bioquímica y la genética, cada una de las cuales encarna una tendencia fundamental de la biología. La bioquímica, que trabaja con extractos, estudia los componentes de los seres vivos y las reacciones del metabolismo; relaciona la estructura y propiedades de los seres con la red de reacciones químicas y con la actividad de ciertas especies moleculares. La genética, por el contrario, examina amplias poblaciones de organismos para analizar la herencia, y atribuye tanto la producción de lo idéntico como la aparición de lo nuevo a las cualidades de una nueva estructura, cuya sede es el núcleo de la célula. Obedeciendo ella misma a leyes rigurosas, esta estructura de tercer orden impera sobre todos los niveles para determinar los caracteres del organismo y sus actividades. Ella dirige el desarrollo del embrión, decide la organización del adulto, sus formas y sus atributos, mantiene las especies a través de las generaciones y hace surgir nuevas especies. En esa estructura reside la «memoria» de la herencia.

## La experimentación

Hasta mediados del siglo XIX los seres vivos eran objeto de observación, pero nunca se buscó alterar su orden para analizarlo. Se consideraba a los organismos en su totalidad para precisar sus propiedades y sus estructuras. Se los comparaba entre sí para determinar sus analogías y sus diferencias. Tanto para Darwin como para Cuvier, era la naturaleza la que hacía los experimentos por el naturalista. Cuando los anatomistas querían localizar los órganos internos, abrían los cadáveres. Cuando los histólogos querían reducir los animales y las plantas a sus componentes elementales, examinaban sus tejidos al microscopio. Cuando los embriólogos estudiaban el desarrollo del huevo, observaban cómo se dividían las células, cómo se formaban las hojas embrionarias y se constituían los órganos. Sólo los fisiólogos intervenían en ocasiones modificando deliberadamente las condiciones de vida para observar los efectos producidos. Sin embargo, no actuaban sobre órganos o tejidos procedentes de un ser, sino sobre el conjunto del organismo. A pesar de la necesidad, evidente a partir de Lavoisier, de una asociación estrecha entre la fisiología y la química, ambas no concordaban ni en sus métodos ni en sus materia-

les. La obligación de recurrir a la fuerza vital para justificar las características moleculares de los organismos constituía una barrera insalvable entre la química de lo viviente y la química del laboratorio.

En la segunda mitad del siglo ya no basta con conocer las estructuras de los órganos y determinar sus relaciones en referencia a sus funciones. Se hace necesario analizar el funcionamiento mismo de los cuerpos vivos y de sus componentes. La fisiología asume entonces un papel preponderante, aunque no sin cambiar de naturaleza. En tiempos de Cuvier, la fisiología constituía esencialmente un sistema de referencia para la anatomía que permitía establecer las analogías sobre las que se fundamentaba la comparación entre los seres vivos y su organización. Para Claude Bernard la fisiología es algo completamente distinto. El funcionamiento de un órgano no se interpreta ya en términos de estructura y textura. Se analiza, se descompone en parámetros diversos y se cuantifica hasta donde es posible. Es la anatomía la que se convierte en una ciencia auxiliar de la fisiología. No se trata ya de una fisiología observacional, basada en lo que Claude Bernard llama «experimentación pasiva», en la que el biólogo se limita a constatar las variaciones introducidas espontáneamente en un sistema, sino de una ciencia «activa» en la que el experimentador interviene directamente, extrae un órgano, lo aísla, lo hace funcionar, altera las condiciones del experimento y analiza las variables. La biología se ve entonces en la necesidad de cambiar de lugar de trabajo. Antes se ejercía en la naturaleza, y cuando el naturalista no estaba en el campo observando los seres en su propio medio, trabajaba en un museo, un parque zoológico o un jardín botánico. De ahora en adelante la biología se hará en el laboratorio.

Hay al menos dos razones que justifican abordar el análisis del funcionamiento del ser vivo no ya en su totalidad, sino por partes. Por un lado, a mediados del siglo se atenúa la exigencia de una fuerza vital. Desde Bichat, el ser vivo se consideraba la sede del enfrentamiento entre las fuerzas de la vida y de la muerte, entre la producción, atribuible a un agente específico de lo viviente, y la destrucción, resultante de procesos físicos y químicos. Con la termodinámica y la síntesis completa de compuestos orgánicos se destruye la barrera existente entre la química de lo viviente y la de la materia inerte. Por otro lado, la teoría celular explica los seres vivos no como totalidades indivisibles, sino como asociaciones

de elementos. Sea cual sea su complejidad, un organismo no es más que la suma de sus unidades elementales. «En última instancia», dice Claude Bernard, «es un andamiaje de elementos anatómicos, cada uno de los cuales tiene una existencia, una evolución, un principio y un fin propios; y la vida total no es más que la suma de estas vidas individuales asociadas y armonizadas»[303]. Para hacer fisiología interesa descomponer a la manera cartesiana la complejidad y la dificultad y, en la medida de lo posible, interrogar no al organismo entero, sino a sus componentes tomados por separado. Para Claude Bernard, la fisiología debe adoptar el enfoque de las otras ciencias experimentales: «Así como la física y la química llegan, a través del análisis experimental, a encontrar los elementos minerales que entran a formar parte de los cuerpos químicos, cuando se quieren conocer los fenómenos de la vida en toda su complejidad, es necesario ir a lo más recóndito del organismo, analizar los órganos, los tejidos, llegar hasta los elementos orgánicos»[304]. Cuando un animal respira, los que trabajan son los glóbulos rojos de la sangre y los alvéolos pulmonares; cuando se desplaza, el trabajo corresponde a las fibras musculares y nerviosas; cuando segrega algo, son las células glandulares las que trabajan. Los órganos y sistemas no existen por sí mismos, sino gracias a las células que los constituyen y que realizan las funciones. Su papel consiste en reunir todas las condiciones, cualitativas y cuantitativas, necesarias para la vida de las células. Los vasos sanguíneos, los nervios y los diversos órganos están dispuestos de modo que puedan crear alrededor de cada célula el medio más propicio para proporcionarle los materiales apropiados, para procurarle alimento, agua, aire y calor. Así, en un organismo, «cada unidad elemental es autónoma en el sentido de que encierra en sí misma, por su naturaleza protoplasmática, las condiciones esenciales de su vida, sin pedirlas prestadas ni tomarlas de las unidades vecinas o del conjunto; por otra parte, está ligada al conjunto por su función o por el producto de esta función»[305]. Para describir el organismo vivo, Claude Bernard hace referencia a modelos, sociedades o empresas, en los que, gracias a la división del trabajo, los

[303] *Leçons sur les phénomènes de la vie*, II, 1879, pág. 2.

[304] *Leçons pathologie expérimentale*, 1872, pág. 493.

[305] *Leçons sur les phénomnes de la vie*, 1, pág. 356.

elementos obran con vistas al interés común. Los órganos «en el cuerpo vivo son como una sociedad avanzada, las manufacturas o los establecimientos industriales que procuran a los diferentes miembros de la sociedad los medios de vestirse, calentarse, alimentarse y alumbrarse». Hacer fisiología equivale a analizar tales sistemas.

Sin embargo, la misma complejidad de los seres vivos comporta dos dificultades. La primera es que, al pretender analizar las unidades elementales en lo más recóndito del organismo, se corre el riesgo de dañarlas gravemente o de perturbar o incluso bloquear su funcionamiento. Así pues, la experimentación debe introducirse en el organismo de manera lenta y progresiva, estudiando primero los sistemas funcionales, luego los órganos, los tejidos y, por último, las células que encierran las propiedades fundamentales de la vida. La otra dificultad deriva de que los fenómenos que tienen lugar en los diferentes órganos no son mutuamente independientes. En las plantas, o en animales inferiores como las hidras y las planarias, los fragmentos cortados del organismo son capaces de sobrevivir de manera autónoma. En los animales superiores, por el contrario, es la subordinación de las partes al todo lo que hace del organismo un sistema unitario, un individuo. El que cada célula posea las propiedades de lo viviente, el que lleve una vida que podríamos llamar autónoma, no significa que deje de trabajar para la comunidad. En consecuencia, el fisiólogo debe, mediante el análisis experimental, descomponer el organismo y separar sus componentes, pero sin contemplarlos como elementos aislados. La fisiología de un órgano sólo puede interpretarse en referencia al conjunto del organismo. «El determinismo de los fenómenos vitales», señala Claude Bernard, «no es sólo un determinismo muy complejo, sino un determinismo armónicamente subordinado»[306]. Los fenómenos de la biología no son más complejos que los de la física por alguna cualidad específica de lo viviente. Su complejidad se debe a la imposibilidad de aislar los fenómenos. Siempre son la resultante de una serie de acontecimientos indisolublemente ligados entre sí y que se generan mutuamente. En fisiología, la complejidad es el producto de la interacción de las funciones, de su íntima solidaridad.

---

[306] *La science expérimentale*, 1878, pág. 70.

El fisiólogo, lejos de pretender sustraer los seres vivos a las leyes que rigen la materia, debe intentar analizar los fenómenos orgánicos con los métodos de la física y la química. Este modo de proceder se justifica, no porque las ciencias fisicoquímicas deban resolver todos los problemas de la biología, sino porque para esclarecer lo complejo siempre hay que partir de lo simple, y la física y la química son más simples que la fisiología. La biología, señala Claude Bernard, «debe tomar de las ciencias fisicoquímicas el método experimental, pero debe conservar sus fenómenos específicos y sus leyes propias». Sólo así la fisiología puede transformarse en una ciencia activa. Hasta entonces penetrar en el organismo suponía alterar su curso y perjudicar su funcionamiento. En lo sucesivo se puede intervenir en el cuerpo vivo, entrar en él para experimentar, sin que las condiciones artificiales creadas por el experimento destruyan la cualidad de lo viviente. Se pueden separar algunos elementos constitutivos del organismo, por medios mecánicos o químicos, estudiar su funcionamiento e incluso, tomando ciertas precauciones, obtener a partir de este análisis conclusiones sobre su función natural en el organismo. Lo que importa es desenmarañar la madeja de las operaciones que se desarrollan simultáneamente en un ser vivo. La experimentación debe llevarse a cabo en unas condiciones lo mejor definidas posible. Se trata de aislar los fenómenos simples. Para Claude Bernard, el fisiólogo debe ser «un inventor de fenómenos, un auténtico capataz de la creación»[307].

Un fenómeno puede derivarse de una observación azarosa o ser la consecuencia lógica de una hipótesis. Aparte de esto, en fisiología hay dos recetas casi infalibles para fabricar fenómenos. La primera consiste en reproducir en el laboratorio lo que la naturaleza efectúa a través de la enfermedad. Fisiología y medicina representan en cierto modo las dos caras de una misma ciencia, no sólo por su objeto de estudio, sino por sus procedimientos metodológicos. En la relación entre lo normal y lo patológico, cada aspecto sirve de guía al otro. La medicina no puede ya contentarse con ser empírica, tiene que basarse en los resultados del análisis fisiológico. Inversamente, el conocimiento de los estados patológicos contribuye al conocimiento del estado fisiológico. La medicina abre el camino a la fisiología, al señalar las líneas de actuación y los resultados

---

[307] *Introduction ¿l'étude de la médecine expérimentale,* 1865, pág. 34.

que deben obtenerse. No se puede reparar una máquina sin conocer las piezas que la componen y su uso. Por otro lado, la avería deliberada de una pieza permite precisar mejor su función. La patología proporciona así modelos al fisiólogo, quien intenta reproducir la enfermedad provocando lesiones lo más localizadas posible y analizando sus consecuencias. Dañar deliberada y específicamente un elemento determinado del organismo por medios mecánicos o químicos, determinar los efectos de la lesión, precisar las reacciones de los demás componentes, he aquí uno de los métodos más eficaces de la fisiología. Un órgano puede extraerse, como se hace con el riñón, o destruirse sin extirparlo, como puede hacerse con el páncreas mediante una inyección de parafina, o pincharse, como se hace con la vesícula biliar tras la ligadura del canal colédoco. Los efectos de la lesión pueden deducirse por comparación con el animal sano. Se puede también intentar remediar el daño administrando a los animales heridos ciertas sustancias, o incluso extractos de tejidos. También se puede ensayar la compensación de ciertas perturbaciones mediante lesiones suplementarias en otros órganos. Este método de exploración a través de lesiones mecánicas hace accesibles al análisis numerosas funciones. Resulta posible así distinguir la «excreción» por parte de un tejido que no produce nada, sino que se limita a permitir la evacuación al exterior de sustancias formadas en el interior del organismo, de la «secreción» por parte de una glándula que reúne y combina ciertos compuestos químicos para crear una sustancia nueva. Las secreciones pueden clasificarse a su vez en «externas», cuando el producto es vertido fuera del organismo, e «internas», cuando el producto es vertido dentro del propio organismo para favorecer la digestión o cualquier otra función fisiológica. A lo largo de más de un siglo de investigaciones, este método permitirá precisar algunos aspectos del metabolismo en los seres animales superiores, analizar el proceso de la digestión, descubrir la existencia de las hormonas, determinar el papel de ciertos nervios, localizar las funciones del cerebro, etc.

La intervención por medios mecánicos puede sustituirse por la provocación de lesiones químicas. Por sus efectos, las sustancias tóxicas simulan los estados de enfermedad, actuando además de manera selectiva sobre los órganos. Tras la inyección de una sustancia tóxica, casi siempre se constata la existencia de lesiones en algún tejido, sea cual fuere su

localización en el cuerpo. Un cierto tóxico afecta a un cierto elemento histológico. El óxido de carbono, por ejemplo, se fija en los glóbulos rojos, impidiéndoles ejercer su papel en la respiración; ciertas sales metálicas dañan las células renales impidiéndoles evacuar en la orina los desechos que transporta la sangre; el curare ataca las células nerviosas impidiendo la transmisión del impulso nervioso, lo que paraliza al animal. También se pueden buscar los antídotos que neutralizan la acción de un veneno específico y restablecen la funcionalidad del órgano lesionado. Con el amplio arsenal de los venenos, la fisiología dispone de un material inmejorable por su simplicidad de empleo, especificidad de acción, regulación del efecto en función de la dosis y, a veces, reversibilidad de las lesiones. El uso de tóxicos iba a convertirse en uno de los métodos privilegiados de la fisiología durante más de un siglo. Todavía sigue gozando de gran favor tanto en el análisis funcional como en el estudio de las reacciones químicas, ya se desarrollen en el organismo, en la célula o en extractos dentro de tubos de ensayo.

La segunda receta para inducir fenómenos fisiológicos se basa en el equilibrio, siempre inestable pero siempre restablecido, entre el organismo y el medio. Tan estrecha es esta interacción que el organismo se ve obligado, por así decirlo, a reaccionar ante cualquier cambio ambiental. Para Claude Bernard, esto es aplicable tanto a los cuerpos vivos como a los cuerpos inanimados. En cualquier fenómeno deben tenerse en cuenta dos cosas: el objeto observado y las circunstancias externas que actúan sobre el objeto y lo inducen a revelar sus propiedades. Si se suprime el medio, el fenómeno desaparece. Sólo hay atracción en la medida en que observamos el comportamiento de dos cuerpos; sólo se genera electricidad a través de la relación que se establece entre el cobre y el cinc. Si se retira uno de los cuerpos, o se suprime el cobre, ya no puede haber ni atracción ni electricidad: éstas se convierten en ideas abstractas. Lo mismo ocurre con los seres vivos, como señala Claude Bernard: «El fenómeno vital no reside enteramente ni en el organismo ni en el medio; se podría decir que es un efecto producido por el contacto entre el organismo vivo y el medio que lo rodea»[308]. Suprimir el medio o alterarlo equivale a eliminar al organismo. En último término, podríamos contemplar

[308] *Leçons sur les propriétés des tissus vivants*, 1866, pág. 6.

el organismo como un «reactivo» de su medio, cosa que ya hizo Lavoisier. Ahora bien, el medio ya no es sólo el fluido, aire o agua, en el que está inmerso el organismo. A partir de Auguste Comte, también es el calor, la presión, la electricidad, la luz, la humedad, la concentración de oxígeno o anhídrido carbónico, la presencia de compuestos químicos, benéficos o tóxicos; en resumen, todo aquello que está en contacto con la superficie externa de un ser vivo y ejerce algún efecto sobre él. Puesto que cada uno de estos factores puede modificarse, se convierten en parámetros experimentales. En el sistema organismo-medio se articulan entonces dos series de variables: unas externas, sobre las que se puede experimentar directamente por medios físicos o químicos, y otras internas, que se expresan en las funciones que se pretende medir con métodos prestados igualmente por la física y la química. Actuando sobre las primeras se llega a las segundas. Para provocar un fenómeno basta con colocar un ser vivo, un órgano, un trozo de tejido, incluso un extracto, en unas condiciones ambientales determinadas y luego variar sistemáticamente cada uno de los parámetros del medio. Se puede afirmar, sin exagerar, que este modo de proceder se ha convertido en la actividad principal de los laboratorios biológicos.

Los seres vivos se clasificaban según su nivel de complejidad. A esta relación estructural se le asoció una relación funcional. Podemos establecer en los seres una correlación entre el nivel de organización y la naturaleza de la interacción entre la organización y su medio. Por un lado están los seres simples, reducidos a un solo elemento anatómico, como los infusorios, o formados por pocas células, como los animales y las plantas inferiores. En ellos todos los elementos constituyentes entran directamente en contacto con el medio aéreo o acuático que los rodea. Por otro lado están los seres más complejos, especialmente los animales superiores, formados por un gran número de células. En ellos sólo los elementos superficiales entran en contacto directo con lo que Claude Bernard llama el «medio cósmico». Los componentes internos del organismo quedan sumergidos en un «medio interno» u «orgánico», que sirve de intermediario con el medio cósmico. En el hombre, por ejemplo, los elementos esenciales, los que cumplen las funciones más importantes, no están expuestos a los caprichos del medio externo, sino que están en contacto con la sangre y los humores que los protegen de toda variación brusca.

De hecho, la característica del medio interno es su constancia. Creado por y para los órganos, el medio interno actúa de alguna forma como un amortiguador que protege de los cambios intempestivos los componentes más importantes del cuerpo, los cuales pueden así trabajar en condiciones casi invariables. «Se puede afirmar», constata Claude Bernard, «que el animal aéreo no vive en realidad en el aire atmosférico, ni el pez en el agua, ni la lombriz de tierra en la arena. La atmósfera, las aguas y la tierra constituyen una segunda envoltura que rodea el sustrato vital, protegido ya por el líquido sanguíneo que circula por todas partes y que forma una primera envoltura alrededor de todas las partículas vivientes»[309]. Los animales superiores viven literalmente en su propio interior.

El concepto de medio interno justifica en términos funcionales la repartición en el espacio que Cuvier atribuía a las estructuras del organismo. Si los elementos más importantes de un ser vivo se localizan en la profundidad del cuerpo es porque así están mejor protegidos contra los avatares del medio ambiente y pueden funcionar al abrigo de las variaciones de temperatura, humedad, presión, etc. A la complejidad de la organización responde la libertad funcional. La autonomía respecto del medio ambiente representa, a fin de cuentas, un factor selectivo para la evolución. Se puede entonces modificar la clasificación de los seres vivos y repartirlos según la naturaleza de su medio y de su grado de autonomía en relación al mundo exterior. Se pueden distinguir así tres formas de existencia. En un primer grupo, que comprende los seres inferiores, la dependencia de las condiciones externas es total; cuando son apropiadas, la vida se desarrolla sin problemas, pero cuando se tornan desfavorables el organismo muere, o bien pasa a un estado de «vida latente», es decir, de «indiferencia química»: todo cambio, toda actividad, todo signo vital, quedan suspendidos. En un segundo grupo, que comprende los animales inferiores y las plantas, el medio interno depende menos de las condiciones externas, de manera que las oscilaciones ambientales repercuten en la vida del organismo, atenuándola o exaltándola, pero sin llegar a suprimirla; en general, es la temperatura corporal la que, aún dependiente de la temperatura externa, regula los movimientos de esta «vida oscilante». Por último, en el tercer grupo, el de los animales superiores, todas las

[309] *Leçons sur les phénomènes de la vie*, 1, pág. 5.

actividades son independientes de las condiciones externas; sean cuales fueren las vicisitudes del medio ambiente, estos organismos viven como si estuvieran en un invernadero. La suya es «una vida constante y libre, independiente de las variaciones del medio cósmico». La libertad del organismo es directamente proporcional a su complejidad.

Si el medio interno y su estabilidad tienen tanta importancia es porque subrayan una de las propiedades fundamentales de los seres vivos: la regulación de las funciones. Aportan una medida del grado de integración del ser vivo, haciendo accesibles a la experimentación la coordinación entre los órganos y las funciones. Este análisis conduce a representar el organismo como un sistema en el que todas las actividades están ajustadas hasta el menor detalle. En el siglo precedente se reconocía ya la interacción de ciertas funciones. Para Lavoisier, la maquinaria animal estaba gobernada por tres «reguladores» principales: la respiración, la digestión y la transpiración. Para Claude Bernard, todas las actividades del organismo en su conjunto están sometidas a mecanismos de regulación: «Todos los mecanismos vitales, por variados que sean, no tienen otro objetivo que el de mantener la unidad de las funciones vitales en el medio interno»[310]. Encontramos entonces mecanismos «equilibradores», «compensadores», «aislantes», «protectores», que regulan la temperatura, la cantidad de agua, la concentración de oxígeno, las reservas alimentarias, la composición de la sangre, las secreciones externas o internas. Cuanto más compleja es la organización de un animal, tanto más perfeccionados están los sistemas de regulación. De ahí la ventaja de utilizar en fisiología aquellos organismos cuyos sistemas están más perfeccionados, es decir, los animales superiores. Para la biología del siglo XIX, la organización de los seres vivos se basa ante todo en la integración de las funciones. La vida es posible, escribe Claude Bernard, porque existe un «equilibrio que es el resultado de una continua y delicada compensación, establecida por la más sensible de las balanzas». Se necesitan mecanismos de regulación para, por un lado, proteger a las células de cualquier variación ambiental intempestiva y, por otro lado, para coordinar las actividades individuales en interés general. El funcionamiento de las partes debe amoldarse a la armonía del todo. Claude Bernard recurre

[310] *Ibid.*, pág. 121.

nuevamente al modelo de la fábrica para describir los fenómenos de regulación en los seres vivos: «En el organismo sucede… lo mismo que en una fábrica de fusiles, por ejemplo, donde cada obrero fabrica una pieza con independencia de los demás, sin que nadie conozca el conjunto en el que deben concurrir todas las piezas. Después parece haber un ajustador que armoniza todas las piezas»[311]. A mediados del siglo XIX, el sistema nervioso es el «gran armonizador funcional» en el animal adulto. Es él quien regula no sólo los latidos del corazón, la respiración, la concentración de oxígeno y la temperatura del cuerpo, sino también el porcentaje de sal y agua, la actividad química del hígado, la secreción de la saliva y del sudor, etc. Al sistema nervioso se sumarán, a principios del siglo XX, otros mecanismos reguladores de carácter químico: las hormonas. A partir de Cannon, esta coordinación, esta constancia del medio interno, recibirá el nombre de «homeostasis». El concepto de regulación es uno de los pilares de la biología moderna. Gracias a él la biología, por una vez, proporcionará un modelo a la física. La cibernética fundada por Wiener se basará en parte en los sistemas observados en los seres vivos.

A mediados del siglo XIX se hace posible, gracias a los métodos de la fisiología, intervenir en los seres vivos para analizar su funcionamiento en los dominios más variados. Con una excepción: la reproducción y la herencia. «La herencia», escribe Claude Bernard, «es un elemento que escapa a nuestro poder y del cual no podemos disponer como hacemos con otras propiedades vitales»[312]. La teoría de la evolución hizo de la reproducción el mecanismo encargado tanto de perpetuar las estructuras como de hacerlas variar. La teoría celular situó este mecanismo en la célula, y más concretamente en el huevo. Pero la herencia y la reproducción se resisten a la experimentación fisiológica. Es cierto que se puede intervenir en el embrión dañando ciertas células o tejidos para obstaculizar su desarrollo. Pero lo único que se consigue es matarlo o comprometer gravemente la ordenación. Nunca se llega a desviar la morfogénesis en una dirección contraria a la naturaleza del huevo. Se puede someter un huevo de conejo a todos los tratamientos imaginables. Se conseguirá destruirlo o hacerlo abortar, pero «no se logrará que de él surja un perro u

---

311 *Ibid.*, pág. 335.

312 *Ibid.*, pág. 342.

otro mamífero»[313]) A la herencia no pueden aplicársele las recetas que se han demostrado eficaces en fisiología. El estudio de las formas ya no pertenece a la química, no depende de sus leyes. Es algo que se sustrae a la experiencia.

Ante la inabordabilidad del problema de la herencia, que puede «contemplar» pero no analizar, la biología se limita a describir la génesis de lo semejante por lo semejante con las imágenes del siglo anterior. Las semillas son sustituidas por los óvulos y los espermatozoides; las moléculas orgánicas por las células; la formación del embrión del que surge el individuo adulto es resultado de la división y la diferenciación celulares. Pero para que el huevo reproduzca el organismo del cual procede, para que se reconstituya lo idéntico a través de las generaciones, se necesita una memoria que guíe las células. «El huevo es un devenir y representa una especie de fórmula orgánica que expresa sintéticamente el ser del que procede y del que ha guardado de alguna forma la memoria evolutiva»[314]. Por evolución se entiende la continuidad de las transformaciones que tienen lugar en el curso del desarrollo embrionario. La memoria expresa una «fuerza hereditaria», un «estado anterior» al mismo huevo, un «impulso primitivo», que pasa cíclicamente de la gallina al huevo y del huevo a la gallina. En lo que se refiere a la naturaleza de esta memoria hereditaria, ésta no se distingue mucho de la que ya propuso el siglo XVIII. Al igual que Maupertuis, Darwin y Haeckel hacen también de la memoria una propiedad de las partículas que constituyen el organismo. Para Darwin, cada célula del cuerpo del genitor envía a las células reproductivas un germen, o «gémula», una especie de emisario encargado de representarla y de reconstituirla en las generaciones sucesivas. Para Haeckel, en las células hay partículas, que llama «plástidos», caracterizadas por movimientos específicos, y dotadas de memoria, que conservan su movimiento propio, por el cual se manifiesta su actividad, a través de las generaciones.

Claude Bernard, en cambio, siguiendo el ejemplo de Buffon, sitúa la memoria no en las partículas constituyentes del organismo, sino en un sistema particular que guía la multiplicación de las células, su diferencia-

---

313 *Ibid.*, pág. 332.

314 *La science expérimentale*, pág. 133.

ción y la formación progresiva del organismo. Según esta teoría, el huevo contiene un «diseño» que se transmite por «tradición orgánica» de un ser a otro. La formación del organismo se adecúa a «un plan» cuya puesta en práctica representa la ejecución de «consignas» muy estrictas. Este plan no sólo dirige el desarrollo del embrión, sino también el funcionamiento del futuro adulto, su estructura, sus propiedades, hasta en los menores detalles; basta pensar que en el hombre ciertas enfermedades se transmiten de padre a hijo. A partir del huevo todo está coordinado, todo está previsto no sólo para la evolución del nuevo ser, sino para su mantenimiento a lo largo de toda su vida. En un organismo vivo, dice Claude Bernard, «todo acto tiene su fin en el ámbito del propio organismo»[315].

Así pues, la fisiología experimental se encuentra desarmada ante el fenómeno de la reproducción. Sin medios para pasar de las hipótesis a las experiencias, sin técnicas adecuadas ni materiales sobre los que ensayar sus propios métodos, la fisiología no tiene cabida en la herencia. Los procedimientos de hibridación, por muy apropiados que resulten para la ganadería y la agricultura, no parecen convenientes para el análisis de la reproducción. De hecho, a la fisiología le interesa el individuo. Actúa sobre el organismo para observar las propiedades, el comportamiento y las reacciones del mismo en circunstancias diversas. Lo que hará accesible la herencia a la experimentación es la observación no de individuos, sino de poblaciones unidas por lazos de parentesco. Darwin ya había adoptado este enfoque para hacer derivar la variación de las fluctuaciones estadísticas inevitables en las poblaciones grandes. Siguiendo el comportamiento de un número limitado de caracteres en poblaciones grandes a través de las generaciones, Mendel será capaz de producir fenómenos hereditarios medibles y de deducir sus leyes. Pero será fundamentalmente la física la que, para manipular los enormes conjuntos de moléculas que constituyen los cuerpos, hará del azar una ley universal.

## El análisis estadístico

[315] *Leçons sur les phénomènes de la vie*, 1, pág. 340.

Desde su nacimiento, la biología se separó deliberadamente de la física. Pero en la segunda mitad del siglo XIX se reanudan los lazos a través de la termodinámica. En primer lugar, porque con los conceptos de equivalencia y de energía desaparecerá una de las singularidades del mundo vivo. En segundo lugar, porque al querer ligar las propiedades de los cuerpos a su estructura interna, la mecánica estadística modificará la manera de considerar las cosas, los seres y los hechos en numerosas actividades humanas. Durante la primera mitad del siglo los fenómenos de la mecánica se analizaban siempre en términos de espacio, tiempo, fuerzas y masas. La fuerza se introducía como causa de un movimiento, preexistente al mismo e independiente de él. Para Carnot, había dos maneras de considerar la mecánica en sus principios: «La primera consiste en considerarla una teoría de las fuerzas, es decir, de las causas que determinan los movimientos. La segunda consiste en considerarla una teoría de los movimientos en sí». Si la materia fuera una, las fuerzas aumentarían sin cesar de número, naturaleza y variedad. Sin embargo, a los movimientos de los cuerpos se asocian cada vez más estrechamente los fenómenos de manifestación del calor. Así es como se constituye un nuevo campo de la física en el que, midiendo las variaciones del calor, se intenta analizar las relaciones existentes entre las propiedades de los cuerpos sin conocer su estructura íntima. Las fuerzas puestas en juego en campos tan distintos como el movimiento, la electricidad, el magnetismo, el calor, la luz o las reacciones químicas, encuentran un denominador común en el concepto de energía. La energía es todo aquello que es trabajo, que produce trabajo o proviene del trabajo; indestructible en valor absoluto, como la materia, la energía puede sufrir toda clase de transformaciones que la hacen aparecer con los aspectos más variados. El principio de equivalencia transforma cada cambio que se verifica en la naturaleza en una conversión de energía. Considera las diferentes formas de energía como independientes y equivalentes. A cada forma le corresponde un factor de intensidad: la altura para la gravitación, la temperatura para el calor, la diferencia de potencial para la electricidad. Las variaciones en un sistema son producto de las diferencias entre estos factores.

Pero la equivalencia de la energía no explica la contradicción entre ciertos hechos de la física. Los fenómenos de la mecánica o de la electrodinámica son reversibles; se pueden efectuar tanto en un sentido como

en otro, y en las ecuaciones de la mecánica el signo de la variable tiempo no tiene relevancia alguna. Los fenómenos térmicos o químicos, por el contrario, son irreversibles. No se puede, por ejemplo, hacer que el calor pase espontáneamente de lo frío a lo caliente. En un sistema aislado a los intercambios con el exterior, la cantidad de energía se mantiene constante. No obstante, esta magnitud no basta para caracterizar el sistema. Es preciso admitir que la energía posee cierta calidad, tanto más elevada cuanto más aprovechable sea, es decir, cuanto más trabajo pueda producir. Hay, por lo tanto, formas de energía nobles como la mecánica, y viles como la calorífica. En un sistema abandonado a sí mismo, la calidad de la energía tiende naturalmente a degradarse, no a mejorar. De ahí el sentido único impuesto a ciertos fenómenos. Cuando el calor circula de lo más caliente a lo más frío, la energía pierde calidad sin cambiar en su cantidad. Como una pelota abandonada en una escalera, tiende siempre a bajar hasta detenerse en el punto más bajo. Este estado de equilibrio es lo que los físicos llaman el nivel de máxima «entropía». La entropía no es un concepto vago; es una cantidad física mensurable del mismo modo que la temperatura de un cuerpo, el calor específico de una sustancia o la longitud de un objeto. La entropía permite describir con precisión la variación del estado de un cuerpo o de un sistema: si un cuerpo recibe calor, su entropía aumenta; si pierde calor, disminuye. Lo que dice la segunda ley de la termodinámica, por la que se rigen los fenómenos físicos del universo, es que en un sistema aislado la energía tiende a degradarse y, por lo tanto, aumenta la entropía. Los movimientos acaban por detenerse, las diferencias de potencial eléctrico o químico por anularse, la temperatura por uniformarse. Sin aporte de energía exterior, todo sistema físico se deteriora y evoluciona hacia la inercia total.

Con la termodinámica, la separación radical establecida a priori por la biología entre los seres y las cosas y entre la química de lo vivo y la del laboratorio, se altera radicalmente. Al conectar las diferentes formas de trabajo entre sí, el concepto de energía y el de equivalencia hacen derivar todas las actividades del organismo de su metabolismo. A fin de cuentas, la producción de movimiento, electricidad, luz y sonido por el ser vivo es posible gracias a la conversión de la energía química liberada por la combustión de los alimentos. Existen así dos generalizaciones que reconcilian la biología con la física y la química: los seres vivos y la materia

bruta están constituidos por los mismos elementos; la conservación de la energía se aplica tanto a los hechos del mundo vivo como los del mundo inanimado. Para quienes, como Helmholtz, descubren el carácter universal de estos principios, la conclusión es simple: no existe diferencia alguna entre los fenómenos que se verifican en los seres vivos y en el mundo inanimado. A simple vista, por su crecimiento y su desarrollo, por el poder de mantener ciertas estructuras de una generación a otra, los seres vivos parecen desafiar la segunda ley de la termodinámica, responsable del deterioro constante del universo. Sin embargo, si bien la termodinámica impone una trayectoria general a un sistema, no excluye por ello la existencia de excepciones locales. No impide que ciertos elementos puedan nadar a contracorriente y a expensas de sus vecinos. Lo que se degrada es el conjunto del sistema y no cada una de las partes. Al recibir la energía del medio en forma de alimentos, los seres vivos están en condiciones de preservar a lo largo del tiempo su bajo nivel de entropía. Además, sin contradecir las leyes de la termodinámica, pueden producir constantemente las grandes moléculas específicas que les caracterizan. Los conceptos de energía y equivalencia desempeñan el papel que la biología atribuyó en un principio a la fuerza vital. A principios de siglo, el organismo consumía fuerza vital para efectuar sus tareas de síntesis y de morfogénesis. A finales de siglo, consume energía.

Más importante todavía, tanto para la biología como para las otras ciencias, es la introducción de las poblaciones grandes como objeto de estudio y del método estadístico para su análisis, dos innovaciones cargadas de consecuencias por la manera de considerar los seres y las cosas. En el siglo XIX los gases permitieron relacionar el calor con el movimiento de las partículas, es decir, asociar las propiedades de un cuerpo con su estructura interna. Un gas puede considerarse una colectividad de moléculas que se desplazan libremente. Según Bernoulli, Joule o Clausius, todas las partículas poseían la misma velocidad, lo que permitía establecer una red de relaciones entre ciertas propiedades de los gases, tales como la presión, el calor y la densidad. Para Maxwell, por el contrario, no era posible atribuir la misma velocidad a todas las partículas, puesto que sus movimientos nacen de las colisiones entre ellas. Un gas se convierte en una colección de «pequeñas esferas, duras y perfectamente elásticas, que actúan una sobre otra solamente durante el impacto». Se

puede construir un modelo puramente mecánico de este gas: las partículas viajan una cierta distancia, reemprenden su viaje, chocan y recomienzan sin fin. Cada partícula posee entonces características únicas de velocidad y movimiento; cada una, dice Maxwell, «lleva consigo su energía y su movimiento». Y las características de cada partícula varían sin cesar por las colisiones aleatorias. Así pues, es impensable estudiar en detalle el comportamiento siempre cambiante de los miles de millones de partículas individuales que forman un gas. No obstante, podemos considerar el conjunto de la población y analizar el comportamiento aplicando métodos estadísticos. Debemos admitir entonces que las velocidades de las partículas se distribuyen según la famosa curva normal, aplicable a fenómenos tan variados como la talla de los adultos de un país, el número de perros de una camada o la dispersión de un tiro. El comportamiento de los individuos escapa a la descripción, pero no así el de la población. Podemos considerarla formada por moléculas ideales que tienen como parámetros las medias de los valores reales. El modelo puramente mecánico de bolas que chocan entre sí permite describir las propiedades de un gas e incluso interpretar la entropía en términos de agitación molecular. Si el hombre no puede impedir la degradación de la energía, ello se debe a su incapacidad de distinguir cada molécula y observar sus características. Ahora bien, según Maxwell, se puede concebir «un ser cuyas facultades estuvieran lo bastante desarrolladas para poder seguir cada una de las moléculas en su carrera; este ser, cuyos atributos serían, no obstante, finitos como los nuestros, llegaría a ser capaz de hacer lo que nosotros no podemos hacer actualmente»[316].

Imaginemos entonces que este demonio minúsculo, capaz de «discernir con la vista las moléculas individuales», maniobra una puerta corredera que se desliza sin roce alguno por un muro que separa dos compartimientos de un recipiente lleno de gas, dejando pasar sólo las moléculas rápidas de izquierda a derecha y sólo las lentas de derecha a izquierda. Al cabo de un tiempo las partículas rápidas se habrán acumulado en el compartimiento de la derecha, que se habrá calentado, y las lentas en el de la izquierda, que se habrá enfriado. De esta forma, «sin gasto de trabajo», el

---

[316] *La chaleur*, trad. francesa, cap. XXII, 1891, pág. 421.

demonio habrá convertido la energía no utilizable en energía utilizable, es decir, habrá invertido la segunda ley de la termodinámica.

No obstante, en la segunda mitad del siglo, el análisis estadístico y el cálculo de probabilidades cambiarán de función y de estatuto. Para Maxwell no eran más que útiles matemáticos adaptados al análisis de un problema concreto: ante la imposibilidad de observar cada individuo por separado, era preciso considerar la población. Para Boltzmann y Gibbs, por el contrario, el análisis estadístico y el cálculo de probabilidades aportan las reglas de la lógica del mundo. Si nos interesan los grandes números no es sólo por la imposibilidad de acceder al análisis de las unidades, sino, sobre todo, porque el comportamiento de los individuos no tiene ningún interés. Aunque llegáramos a conocer todos los detalles y pudiéramos someterlos a un tratamiento matemático, esto no nos aportaría ninguna información relevante. ¿De qué serviría conocer la distancia recorrida por una molécula concreta, o saber que tal molécula chocará con la pared del recipiente que contiene el gas en tal momento, en tal lugar y en tales circunstancias? Aun suponiendo que fuera posible analizar en detalle el comportamiento de todas y cada una de las unidades, ¿qué otra cosa podríamos hacer con la masa de resultados obtenidos sino compilarlos y tratarlos para extraer de ellos la ley estadística que rige el conjunto de la población? Lo que interesa saber no es qué partículas colisionan en un momento dado, sino cuántas colisiones se producen por término medio y cuál es la probabilidad de colisión de una partícula.

Puede verse cuánto difiere este enfoque de todos los precedentes salvo el de Darwin. Para éste, como para Boltzmann y Gibbs, las leyes de la naturaleza no actúan sobre los individuos, sino sobre las poblaciones. Por muy irregular que sea el comportamiento de las unidades, la magnitud de los números puestos en juego acaba por imponer una regularidad al conjunto. Pero la analogía entre ambas formas de pensar va aún más lejos. En primer lugar, porque la mecánica estadística y la teoría de la evolución introducen la noción de contingencia en el centro mismo de la naturaleza. Desde Newton, toda la física descansaba sobre un determinismo rígido. Se admitía que el comportamiento de todas las moléculas, así como el de todos los cuerpos visibles, estaba estrictamente impuesto por un sistema de causas que la ciencia se esforzaba en incluir en las leyes de la naturaleza. Para que se repitieran con precisión los fenómenos obser-

vables, era preciso que los procesos de los cuales procedían, los procesos elementales, estuvieran sometidos a un determinismo inflexible. Pero durante la segunda mitad del siglo XIX muchas de las llamadas leyes de la naturaleza pasaron a ser leyes estadísticas. Éstas sólo se realizan rigurosamente en la medida en que el número de individuos en juego es muy elevado. Las predicciones derivadas de estas leyes no pueden formularse en virtud de una causalidad estricta, sino que tienen carácter probabilístico y sólo se verifican dentro de unos límites determinados que pueden definirse con precisión. El que esta probabilidad linde con la certeza en los fenómenos observables se debe a que los cuerpos visibles están formados por un enorme número de moléculas. Pero cuando se trata de poblaciones poco numerosas las desviaciones no son en absoluto raras. Son lo que Boltzmann llama las «fluctuaciones estadísticas». Cuando existe un mecanismo particular que las favorece en algún sentido, como es el caso de la selección natural, entonces las excepciones acaban imponiéndose.

La segunda analogía importante entre teoría de la evolución y mecánica estadística reside en el modo de enfocar la irreversibilidad del tiempo. Para la evolución, es el mecanismo de la selección lo que hace irreversible todo el proceso. Cuando un grupo de organismos actúa en un sentido determinado, y cuando se ha operado la selección de ciertas variantes en etapas sucesivas, ya no hay posibilidad de retorno al estado anterior. La selección natural puede acentuar la diferenciación y hasta desviar la dirección, pero no puede recorrer las etapas pasadas en sentido inverso. Para la física, la segunda ley de la termodinámica es la que impone un sentido a los fenómenos. No puede darse ningún evento en sentido opuesto al observado porque ello implicaría una disminución de entropía. Es imposible invertir el curso del universo, como podría hacerse con un sistema puramente mecánico como, por ejemplo, un reloj ideal. Tanto en el mundo orgánico como en el mundo físico, las secuencias de la película que describe la evolución no pueden proyectarse marcha atrás.

Sin embargo, en los procesos de degradación de la energía persistía una cierta aura de misterio, como si la irreversibilidad exigiese algún elemento secreto común a los diferentes mecanismos que operan en la naturaleza. Con la termodinámica estadística desaparece la necesidad de un factor oculto. La irreversibilidad traduce los cambios en la distribu-

ción de las moléculas, de su disposición en los cuerpos. El sentido único de los cambios es el resultado de una propiedad inherente a la estructura misma de la materia, puesto que, a partir de Boltzmann, la segunda ley de la termodinámica, que rige la marcha del universo y anota en su balance un incremento neto de entropía, termina por no ser más que una ley estadística. Incluso se convierte en *la* ley estadística por excelencia. La mayoría de los fenómenos físicos representa simplemente la tendencia natural de las poblaciones de moléculas a pasar del orden al caos. El orden de las moléculas representa para el físico un valor estadístico medible. El calor almacenado en el Sol, por ejemplo, constituye una enorme provisión de energía, utilizable en la medida en que no se distribuye uniformemente por todas las regiones del universo, sino que se concentra en un espacio limitado. Este calor tiende a dispersarse espontáneamente con el tiempo y la temperatura a uniformizarse, lo que significa un aumento del desorden o de la entropía del universo. El hecho de que el calor fluya siempre de lo más caliente a lo más frío no se debe a ninguna ley secreta que le obligue a hacerlo, sino simplemente a que el proceso inverso es billones de veces menos probable, por lo que nunca se observa en la práctica, aunque no sea imposible en teoría. Decir que las moléculas pasan de un estado menos probable a otro más probable evoca las piedras de un monumento que un terremoto ha transformado en ruinas, o los libros de una biblioteca bien ordenada esparcidos por lectores descuidados. La termodinámica estadística dice que si se mezclan las cartas de una baraja lo más probable es que pasen del orden al caos. Pero no dice que lo contrario sea imposible. Si el número de ensayos es lo bastante elevado, es posible e incluso seguro que se dé una ordenación espontánea. Sin embargo, para obtener este resultado se requeriría un lapso de tiempo enorme, de manera que tales excepciones no pueden perturbar la marcha general del universo. El curso de los acontecimientos discurre por la dirección estadísticamente más probable. La irreversibilidad de la evolución darwiniana deriva de la imposibilidad de volver atrás una vez los organismos han apostado por una determinada especialización. La irreversibilidad de la termodinámica de Boltzmann deriva de la improbabilidad de que las moléculas del universo pasen espontáneamente del desorden al orden.

La mecánica estadística transforma por completo la visión del mundo del siglo XIX porque, primeramente, hace derivar las propiedades de los cuerpos de la estructura misma de la materia. A partir de Gibbs, el análisis estadístico no se aplica solamente al comportamiento de las poblaciones grandes, sino al de cualquier «sistema conservativo», con independencia de sus grados de libertad. Esto permite analizar la distribución de posiciones y momentos compatible con la energía de un sistema dado, distribución que al cabo de un tiempo lo bastante largo acaba por recorrer todo el sistema. La mayoría de los eventos que tienen lugar en el mundo físico conciernen al tratamiento estadístico. Todas las reacciones químicas, sus velocidades, sus variaciones con la temperatura, los procesos de fusión y de evaporación, las leyes de la presión, etc., todos estos fenómenos se basan en la hipótesis subyacente de cambios en el orden de las moléculas. Todos se rigen por leyes estadísticas.

Con la mecánica estadística se perfecciona el aparato matemático que permite analizar la estructura y la evolución de cualquier sistema que maneje grandes números. De este modo se hacen accesibles al análisis muchos objetos, hechos e incluso propiedades antes intratables, en la medida en que puedan contarse y clasificarse, es decir, siempre que se trate de un sistema discontinuo. Este tipo de análisis estadístico descansa sobre la distribución de elementos discretos. La discontinuidad, tanto la natural (como en las poblaciones de unidades) como la introducida por los métodos de medición que imponen siempre la elección entre dos valores límites, constituye una condición necesaria para este tipo de análisis. Para analizar lo discontinuo basta echar mano del concepto matemático más simple y más antiguo, el de los números enteros. El arte de aplicar el método estadístico consiste en poder contar números enteros. Cuanto mayor es el número de casos observados, más reproducibles son los resultados. Aun así, el mecanismo estadístico posee tal seguridad, funciona con tal precisión de detalle, que es posible ajustar las condiciones de manera que baste con un número limitado de observaciones. La utilización por Maxwell del método estadístico para analizar fenómenos físicos fue un tanto accidental, pero a partir de Boltzmann y Gibbs la técnica se extiende a los campos más variados, incluso aquellos en los que a primera vista parecía difícil, si no imposible, introducir la discontinuidad necesaria. Se consiguen obtener leyes prácticas a partir de fenó-

menos de los que se ignora totalmente el determinismo. Ya no se buscan las causas de sucesos aislados, puesto que se hace posible observar un gran número de sucesos de la misma clase, seleccionarlos, componer los resultados y, finalmente, calcular el promedio con ayuda de reglas empíricas. De este modo pueden predecirse sucesos futuros de la misma clase, no con certidumbre, pero con una probabilidad muchas veces cercana a la certeza. Estas predicciones sólo son válidas para un conjunto de sucesos, con exclusión de excepciones y detalles. De hecho, una de las características del método estadístico consiste en ignorar deliberada y sistemáticamente los detalles. Su finalidad no es obtener toda la información posible sobre un evento particular, ni tampoco describir cada circunstancia con minuciosidad, sino la elaboración de una ley que trascienda los casos individuales.

La segunda razón por la que la termodinámica estadística transforma por completo la visión de la naturaleza es que, con objeto de conferirles el mismo estatuto de cantidades mensurables, asocia dos conceptos hasta entonces desconectados, si no opuestos: el orden y el azar. Todo el arsenal de fuerzas e impulsos, todas las cargas y potenciales que conservaban, a pesar de todo, cierto sabor a misterio y arbitrariedad, quedan relegados a la categoría de factores auxiliares. Representan solamente distintos aspectos de un mecanismo más profundo, más universal, que emerge como la ley general del universo: la tendencia natural de las cosas a pasar del orden al desorden por efecto de un azar calculable. Esta ley no pretende proponer una explicación causal de los sucesos. No intenta explicar por qué sobrevienen, sino cómo. La noción misma de causalidad pierde así algo de su significado y, por ende, de su interés. De este modo se atenúa mucho el misterio que todavía impregnaba la representación de la naturaleza durante la primera mitad del siglo XIX. El que muchos fenómenos totalmente diferentes y aún no explicados muestren con tanta frecuencia caracteres comunes significa que, de alguna manera, se fundamentan en un mecanismo común. Esto no concierne sólo a los fenómenos que son competencia de la física, sino también, a finales del siglo y principios del siguiente, a los de campos como la astronomía, la geología, la biología, la meteorología, la geografía, la historia, la economía, la política, la industria y el comercio; en suma, los dominios más variados de la actividad humana, y hasta los detalles de la vida cotidiana.

No es exagerado decir que nuestra concepción actual de la naturaleza fue forjada en parte por la termodinámica estadística. Esta transformó tanto los objetos como la actitud de la ciencia. En ella se basa el cambio de mentalidad del que surgió, a principios del presente siglo, el mundo físico actual. Un mundo de relatividad y de incertidumbre, sometido a las leyes cuánticas y a la teoría de la información, donde materia y fuerza representan dos aspectos de una misma cosa. La termodinámica estadística está en la base de ciencias nuevas como la fisicoquímica, que fundamenta las propiedades químicas de los cuerpos en su estructura física. La experimentación puede hacerse así extensiva a los más variados campos de la biología. En primer lugar, porque las reacciones químicas propias de los seres vivos quedan sometidas a las leyes que rigen la materia. En segundo lugar, y especialmente, porque el método de análisis estadístico transforma la biología en una ciencia cuantitativa. A finales del siglo XIX, el estudio de los seres vivos no consiste ya solamente en una ciencia del orden, sino también de la medida.

## El nacimiento de la genética

La obra de Mendel es otra demostración de que Darwin, Boltzmann y Gibbs no representan una actitud minoritaria, sino una tendencia que se impone en la segunda mitad del siglo XIX. Las observaciones sobre la herencia se habían acumulado desde hacía siglos, pero hasta entonces no se convierte en objeto de estudio científico propiamente dicho. Aun cuando el siglo XIX hubiera renunciado ya a hibridar especies distintas, los cruzamientos que se realizaban ponían en juego variedades que diferían en todo un abanico de caracteres. La herencia era un problema reservado a horticultores y criadores. Durante todo el siglo XIX las exigencias económicas obligaron al incremento de las cosechas y los rebaños y su adaptación a las condiciones locales de clima, temperatura y recursos. Era preciso aumentar el rendimiento no sólo elevando el número de animales y plantas por hectárea, sino mejorando la calidad del género. Las experiencias prácticas se llevaban a cabo en las huertas y los pastos, en las colmenas y los corrales. Una vez realizados los cruzamientos, se examinaban algunos individuos de la descendencia para hacer una descripción lo más completa posible de ellos, sin omitir ningún detalle. La

mayoría de caracteres considerados no se prestaba a una discriminación neta, sino que constituían matices de una serie casi infinita de intermediarios. De hecho, cuanto más se fundían en el híbrido los caracteres de los progenitores, más se ajustaba el resultado a la idea que se tenía de la herencia. Se observaba que los caracteres reaparecían a lo largo de las generaciones. Se constataba la desaparición de alguno de ellos durante un tiempo y su reaparición posterior. Naudin, por ejemplo, señaló la oposición entre la uniformidad de los descendientes en la primera generación híbrida y «la extrema confusión de formas» en la segunda generación: unas imitaban las del padre, otras las de la madre, como si los híbridos fueran «mosaicos vivientes»[317] cuyos elementos no pudieran ser percibidos por el ojo humano. Gartner observó una gran heterogeneidad en la progenitura de los híbridos: mientras que ciertos individuos tenían una descendencia pura, otros producían mezclas. Sin embargo, lo que caracterizaba la herencia era sobre todo su complejidad.

En Mendel convergen las dos corrientes que dan lugar a la constitución de una ciencia de la herencia: el saber práctico de la horticultura y el teórico de la biología. Hijo de granjero, en su infancia veía a su padre plantar, hibridar, injertar, y nunca dejó de preguntarse cómo se formaban las especies, lo que hizo que se interesara por la evolución. Tras ordenarse sacerdote, se le autorizó a cultivar plantas en el jardín de su monasterio. Pero lo que realmente fascinaba a Mendel era la naturaleza de la herencia. Empezó a producir híbridos, no con la finalidad de aumentar el rendimiento, sino para investigar el comportamiento de los caracteres a lo largo de las generaciones. La actitud de Mendel difiere drásticamente de la de sus predecesores.

«De todas las experiencias realizadas, ninguna se hizo a una escala lo bastante grande y con la suficiente precisión para permitir determinar el número de las diferentes formas bajo las cuales aparecen los descendientes de los híbridos, ni clasificar estas formas con certidumbre según las generaciones sucesivas o precisar sus relaciones estadísticas»[318]. El enfo-

---

[317] «Nouvelles recherches sur l'hybridité dans les végétaux», en *Ann. Sc. Nat. Botanique*, serie 4, 19, pág. 194.

[318] *Versuche über Pflanzen-Hybriden*, 1866, trad. inglesa, reed. en *Classic Papers in Genetics*, 1959, pág. 2.

que mendeliano comporta sobre todo tres elementos nuevos: la manera de contemplar la experimentación y de elegir el material conveniente; la introducción de una discontinuidad y el manejo de poblaciones grandes, lo que permite expresar los resultados numéricamente y someterlos a un tratamiento matemático; el empleo de un simbolismo simple que permite un diálogo continuo entre la experimentación y la teoría.

De entrada Mendel presta especial atención a la selección del material. Prueba varias plantas antes de decidirse por el guisante. Busca variedades cuya pureza esté garantizada por varios años de cultivo en condiciones rigurosas. Las variedades destinadas a la hibridación deben diferir entre sí por un número limitado de rasgos. Hay que descartar los caracteres que «no permiten una discriminación neta y segura, ya que la diferencia en este caso es del tipo "más o menos", lo que a menudo es difícil de definir»[319]. Sólo deben retenerse los rasgos cuya discriminación pueda establecerse sin ambigüedad, como la forma y el color de los granos, de las vainas, la repartición de las flores alrededor del tallo, etcétera. Para evitar una complejidad insuperable de entrada en el análisis de las hibridaciones, es importante olvidar los detalles y limitarse al estudio de un pequeño número de caracteres: primero uno, después dos, después tres, teniendo buen cuidado en cada caso de distinguir todas las combinaciones posibles en la descendencia. Para ello hay que respetar dos condiciones: por un lado, las experiencias deben hacerse a una escala lo bastante amplia para poder ignorar los individuos y preocuparse únicamente de poblaciones; por otro lado, hay que seguir el comportamiento de los caracteres no solamente entre la descendencia de una pareja, sino a través de una larga serie de generaciones sucesivas.

Por su propia naturaleza, esta experimentación conduce a expresar los resultados de una manera completamente nueva. Gracias a la discontinuidad introducida deliberadamente en la discriminación de los caracteres, es suficiente contar en cada generación los individuos pertenecientes a cada una de las clases posibles. Cada clase se traduce en un número entero, tanto mayor cuanto más vasta es la escala de la experiencia. Estos números pueden someterse al análisis estadístico para establecer sus relaciones, las cuales acostumbran a ser simples. Así, los híbridos de

[319] *Ibid.*, pág. 4.

primera generación, producto de los cruces entre variedades que difieren en un solo carácter, se parecen exclusivamente a uno de los padres y nunca al otro. El carácter que no se expresa se llama «recesivo» en relación al carácter que se expresa, o «dominante». En la generación siguiente, descendiente de los híbridos, las formas recesiva y dominante aparecerán en una relación de 1 a 3. De cada tres portadores del carácter dominante, dos serán también portadores del carácter recesivo. Si las variedades cruzadas difieren no en uno, sino en dos caracteres, los híbridos de la primera generación serán otra vez idénticos. En la generación siguiente, los descendientes de estos híbridos se distribuirán en cuatro clases de proporciones 1:3:3:9. Tres de estas clases pueden subdividirse todavía en dos en la generación siguiente. El número de clases aumenta con el número de caracteres puestos en juego. Dice Mendel: «Los descendientes de los híbridos en los que se combinan varios caracteres diferenciales representan los términos de una serie de combinaciones donde se reúnen las series desarrolladas de cada par de caracteres diferenciales… Si *n* representa el número de caracteres diferenciales en los dos linajes originales, 3*n* nos da el número de términos en la serie de combinaciones, 4*n* el número de individuos pertenecientes a la serie y 2*n* el número de uniones que permanecen constantes»[320]. En otras palabras, los diferentes caracteres se transmiten independientemente unos de otros. En poblaciones lo bastante grandes se puede prever su distribución.

Finalmente, la simplicidad de una elección binaria entre dos formas de un carácter permite una representación simbólica simple. Dice Mendel: «Si designamos por A uno de los caracteres constantes, por ejemplo el dominante, a el recesivo y Aa la forma híbrida combinada, la expresión A + 2Aa + a nos dará los términos de la serie para los descendientes de los híbridos de un sólo carácter»[321]. Es en la interpretación simbólica de los resultados donde de alguna manera se articulan la teoría y la experimentación. Por un lado, permite formular hipótesis a partir de las distribuciones observadas. Por otro lado, conduce inmediatamente a predicciones verificables por la experiencia. Así, de las relaciones observadas entre las combinaciones de caracteres pueden extraerse ciertas conclu-

---

[320] *Classic Papers in Genetics*, págs. 13-14.

[321] *Ibid.*, pág. 10.

siones relativas a la formación y constitución del polen y los huevos. Un linaje sólo se mantiene puro y constante en la medida en que los organismos proceden de polen y huevos portadores del mismo carácter, por ejemplo A. Dado que en una planta híbrida se dan las dos formas del mismo carácter, A y a, es razonable concluir que en los ovarios del híbrido Aa se forma la misma cantidad de huevos de cada uno de los tipos A y a. De manera general, cuando entran en juego numerosos caracteres, el híbrido produce tantas clases de polen o huevos como combinaciones pueden darse en la descendencia. La experiencia confirma esta presunción. En un híbrido Aa, señala Mendel, «los emparejamientos entre cada tipo de polen y cada tipo de huevo son cuestión de azar, pero, según la ley de probabilidad, siempre encontraremos que, en promedio, cada tipo de polen A y a se unirá con la misma frecuencia a cada tipo de huevo A y a; en consecuencia, uno de cada dos granos de polen A se unirá a un huevo A y el otro a un huevo a, y lo mismo puede decirse de los granos de polen a»[322]. Los resultados de los cruzamientos pueden representarse mediante un gráfico simple. Ahora bien, para representar la condición individual no basta con un solo símbolo; se necesitan dos, que Mendel reúne en forma de fracción. En la descendencia del híbrido A/a se dan cuatro combinaciones, A/A, A/a, a/A, a/a. Sólo la primera y la última son puras y corresponden a los caracteres de los padres. Al ser la forma A dominante sobre a, las tres primeras poseen el mismo carácter observable, aunque su descendencia tiene una estructura distinta. Esto explica la relación de 1 a 3 entre las formas recesiva y dominante en la segunda generación. Estos valores representan únicamente el promedio de numerosas experiencias que implican la autofecundación de híbridos. En las flores o plantas individuales, los términos de la serie se apartan a menudo del promedio. Los casos individuales, escribe Mendel, «deben necesariamente estar sometidos a fluctuaciones; los verdaderos valores pueden determinarse solamente a partir de la suma de casos individuales en la mayor cantidad posible; cuanto mayor es su número, mejor se eliminan los efectos del azar»[323].

---

[322] *Ibid.*, pág. 18.

[323] *Ibid.*, pág. 19.

Con Mendel, los fenómenos de la biología adquieren de golpe el rigor de las matemáticas. La metodología, el tratamiento estadístico y la representación simbólica confieren a la herencia toda una lógica interna. A excepción del episodio preformacionista, la manera de considerar el problema de la herencia apenas había cambiado desde hacía más de veinte siglos. La teoría de la evolución exigía un proceso capaz tanto de reproducir en el hijo los rasgos de los progenitores como de hacerlos variar. Lo que Darwin llamaba «pangénesis» en tiempos de Mendel no se alejaba mucho de lo que ya imaginaron Hipócrates y Aristóteles en la antigüedad o Maupertuis y Buffon en el siglo anterior. Según la pangénesis, cada fragmento del cuerpo, cada célula, producía un pequeño germen de sí mismo, o «gémula», que se instalaba en las células germinales con la misión de reproducir este fragmento en la generación siguiente. Esta teoría tenía la ventaja de admitir tanto la posibilidad de variaciones surgidas espontáneamente, sin la influencia de factores externos, como la inserción de caracteres adquiridos en la herencia. Al igual que Maupertuis y Buffon, Darwin tampoco supo diferenciar entre el cuerpo de los progenitores, sus simientes y el cuerpo del hijo. Transmitidos por los primeros, los mismos elementos pasaban a las segundas para formar el tercero. La herencia sólo podía localizarse en la organización misma, en la estructura secundaria a la que se refería todo lo perceptible de un ser vivo en cuanto a estructuras y funciones. Mendel contempla la herencia de un modo completamente nuevo, a través de fenómenos que se analizan con precisión. Ni la regularidad de las segregaciones ni la dominancia de los caracteres ni la persistencia del estado híbrido concuerdan con la pangénesis. Para representar la condición individual se necesitan dos símbolos. El símbolo, por lo tanto, no puede corresponder ni a un carácter observable ni a su delegada la gémula. De ahí la necesidad de distinguir entre lo que se ve, el carácter, y lo que subyace tras el mismo, los dos aspectos que la genética del siglo XX denominará fenotipo y genotipo. Si bien el primero viene determinado por el segundo, la expresión del genotipo por el fenotipo es sólo parcial. Los caracteres traducen la presencia oculta de partículas unitarias, lo que Mendel llama «factores». Éstos son mutuamente independientes, y cada uno gobierna un carácter observable. La planta posee dos ejemplares de cada factor, uno aportado por el polen y otro por el huevo que la generaron.

Lo que la herencia transmite no es una representación global del individuo, ni tampoco una serie de emisarios procedentes de todos los puntos del cuerpo de los progenitores que se recompone en el hijo como las piedras de un mosaico, sino una colección de unidades discretas, cada una de las cuales rige un carácter. Cada unidad puede existir en diferentes estados que determinan las variantes del carácter correspondiente. Como todo organismo recibe de cada uno de los progenitores un juego completo de unidades, éstas se reajustan al azar a través de las generaciones. La organización que estudian los anatomistas, los histólogos y los fisiólogos, la estructura de segundo orden a la cual se refieren las formas y propiedades de un ser vivo, no es suficiente para explicar la herencia. Hay que apelar a una estructura de orden superior, más oculta, más profundamente enterrada en el cuerpo. La memoria de la herencia se emplaza en una estructura de tercer orden.

El mismo enfoque que condujo a Boltzmann a relacionar las propiedades de los cuerpos con su estructura interna y le permitió deducir la ley que rige la evolución de la materia condujo a Mendel al análisis de la herencia y al conocimiento de sus leyes. Ambos trataron con elementos discontinuos. En ambos casos resulta imposible prever el comportamiento de un solo elemento librado al juego del azar. En ambos casos se logra extraer orden del azar mediante el tratamiento estadístico de poblaciones grandes. El comportamiento concreto de cada unidad carece de importancia, se trate de factores hereditarios o de moléculas de un gas. La combinación de caracteres que se realiza en una planta concreta no tiene para Mendel mayor interés que el que tenía la trayectoria de una molécula concreta para Boltzmann. Fue así como la herencia llegó a convertirse en objeto de análisis. En el método experimental, los humores, las fuerzas oscuras, los designios misteriosos que desde la antigüedad parecían moldear el carácter de los seres vivos, se sustituyen por la materia, por partículas y por leyes. La representación de los seres vivos sufre una transformación total. En buena lógica, toda la práctica de la biología tenía que haberse trastocado, pero no fue así en absoluto. El caso de Mendel es un buen ejemplo de la imposibilidad de trazar una historia lineal de las ideas, de encontrar una sucesión de etapas que se ajuste a la lógica. Si bien la obra de Mendel estaba en consonancia con la física de su tiempo, no tuvo influencia alguna sobre sus contemporáneos. El siglo

XX hará de Mendel el creador de la genética y convertirá su documento en la partida de nacimiento de esta ciencia. Hasta bien entrado el siglo, su obra permanecerá ignorada u olvidada. No es que el reverendo Gregor Mendel fuera un desconocido entre los científicos de su época. Aunque no era un profesional, se relacionó con algunos de los biólogos más eminentes del momento, a quienes describió detalladamente sus experiencias en una extensa correspondencia. Pero ninguno le hizo mucho caso. Cuando, en una tarde de febrero de 1865, Mendel leyó su primera comunicación en la sociedad local de ciencias naturales, sólo había unas cuarenta personas en la Realschule de Brno. La asamblea estaba formada por astrónomos, físicos, químicos, en fin, un público experto. Mendel habló durante una hora de la hibridación de los guisantes. Un tanto desconcertados ante la aplicación de la aritmética y el cálculo de probabilidades al problema de la herencia, los presentes escucharon con paciencia y aplaudieron cortésmente cuando Mendel terminó su charla, pero nadie se interesó por el tema.

«Tal como esperaba», escribió Mendel a Nageli, «encontré mucha resistencia; pero, por lo que veo, nadie se ha tomado la molestia de repetir mis experiencias»[324]. Cuando Mendel muere unos años más tarde, es un hombre respetado por su obra social, pero su obra científica sigue ignorada. Cuando se «redescubren» sus resultados a principios del siglo siguiente, muchas de las copias de la memoria de Mendel tienen las páginas aún sin cortar.

¿Cómo puede afirmarse, entonces, que el espíritu está siempre a la espera de ideas nuevas para apoderarse de ellas y explotarlas, o que el desarrollo de las ciencias está guiado por la sola finalidad de la lógica? El pensamiento sólo puede maniobrar dentro del espacio que le otorga el enfoque del momento y en torno a los objetos de análisis que se le ofrecen. La genética se constituye como ciencia tras la transformación del estudio de la célula a finales del siglo XIX, cuando se precisa su estructura, se revela la existencia de los cromosomas y sus movimientos acompasados como una danza, y se modifica también su papel al descartarse la pangénesis en favor del «germen», linaje celular reservado para la repro-

[324] Carta a Carl Ngeli, 18 de abril de 1867, reed. en *Great Experiments in biology*, pág. 229.

ducción y protegido de las vicisitudes a las que están sometidos los cuerpos vivos.

## El juego de los cromosomas

En la segunda mitad del siglo XIX los biólogos concentraron gran parte de su esfuerzo en el estudio de la célula. Esta ya no es solamente la unidad elemental del ser vivo, el último término del análisis anatómico, sino que se convierte en el lugar donde se articulan las actividades del organismo, el «hogar de la vida» en palabras de Virchow. En las células se efectúan las reacciones del metabolismo y se elaboran las moléculas características de lo viviente. A través de su diferenciación se forman los órganos y se estructura el cuerpo del adulto. A través de su división se perpetúa la organización. En lo sucesivo toda célula nacerá de otra célula. La reproducción se efectúa por una excrecencia del individuo», dice Haeckel. Como puede verse con nitidez en los seres unicelulares que se multiplican por división, los fenómenos de la herencia traducen en realidad los del crecimiento. Cada uno de estos minúsculos organismos crece hasta escindirse en dos mitades idénticas, no sólo en tamaño, sino también en cuanto a forma y estructura. Se comprende entonces por qué el vástago se parece a su ancestro: es un fragmento de él. Algo parecido ocurre con los seres pluricelulares que se forman por multiplicación de una sola célula inicial, el huevo. El cuerpo de dicho organismo puede verse como una colonia de células donde la división del trabajo exige la diferenciación de las unidades, de suerte que ciertas células se encargan sólo de las funciones necesarias para la respiración, otras de la reproducción, otras de la locomoción y otras de la digestión. Ya se trate de seres unicelulares o de organismos complejos, la herencia es siempre el resultado de la continuidad de las células. Así pues, es en el espacio celular donde deben situarse tanto las reacciones químicas que dan al organismo su especificidad como el sistema que le confiere la propiedad de producir semejantes. Las células germinales contienen, ya no en efigie, sino en potencia, el esbozo del organismo futuro. Estas gotas albuminosas encierran la especialización de todas las células que se derivarán de ellas. El análisis científico converge, por lo tanto, en el funcionamiento y la división celulares.

No se trata de hacer una zoología de las células, ni de precisar la posición, las relaciones y las propiedades de todas las unidades que componen un organismo, ni de conocer su filiación exacta, ni de trazar un mapa detallado. En realidad, existen pocas posibilidades de que algún día se llegue a desenmarañar el embrollo de las células y fibras de un organismo complejo. Sin embargo, aunque las células de un organismo difieran entre sí en cuanto a forma, posición y función, no por ello dejan de estar cortadas según un mismo patrón. Más allá de su diversidad existe una unidad de estructura. Sea cual fuere su naturaleza y su origen, una célula aparece siempre como un corpúsculo semilíquido constituido por una sustancia albuminosa, el protoplasma. Contiene un núcleo más o menos grande, más o menos redondeado, formado también por una sustancia albuminosa. Está limitada por una membrana, y suele contener numerosas partículas. Pero lo que domina la organización celular es la presencia de dos constituyentes mayores. Dice Haeckel: «Núcleo y protoplasma, núcleo celular interno y sustancia celular externa, he aquí las dos únicas partes esenciales de toda célula verdadera. Todo lo demás es secundario y accesorio»[325]. Es necesario, por lo tanto, precisar la composición y la función de ambos constituyentes a fin de determinar lo que la célula transmite a sus descendientes para que se formen a su imagen y semejanza.

La citología, ciencia que intenta explorar el espacio celular, conjuga intereses muy distintos: interesa a la fisiología, al desarrollo embrionario, a la herencia, a la evolución y a la morfología. La unidad la aporta el método, el lenguaje y el material. A finales del siglo XIX el microscopio óptico alcanza el máximo poder de resolución que le permite la física, pero gracias al empleo de compuestos químicos que colorean selectivamente las estructuras celulares los citólogos aumentan su capacidad de discriminación e identificación. Se encuentra así una vía de acceso a la composición química de los constituyentes celulares; el núcleo, por ejemplo, se tiñe fácilmente con ciertas sustancias básicas. Poco a poco, el paisaje que se descubre en el fondo del microscopio va adquiriendo relieve. Describir los detalles supone el empleo de un lenguaje nuevo. Hacia el final del siglo se elabora todo un vocabulario inédito yuxtapo-

[325] *Anthropogénie*, trad. francesa, París, 1877, pág. 84.

niendo (hibridando, podríamos decir) raíces griegas o latinas. El discurso del biólogo pronto se hace impenetrable para el no iniciado. La facilidad de colorear el núcleo, por ejemplo, se evoca simplemente con el radical «cromo». De ahí proceden los términos «cromatina», acuñado por Flemming para la sustancia nuclear, «cromosoma», introducido por Waldeyer para los filamentos distinguibles en el núcleo, «cromómero», propuesto por Balbiani y Van Beneden para las bandas de los cromosomas, y otros (cromátida, cromidio, cromidiogamia, cromiolo, cromocentro, cromonema, cromoplasto, cromospira, etcétera). La precisión en el detalle se mide por la de los nombres. Finalmente, la citología se distingue por el material que emplea. Su libertad de elección es absoluta, puesto que lo que pretende analizar no son las características de ciertos tipos de células, sino los atributos comunes a todas ellas. Esto le permite concentrarse en algunos organismos que por su estructura y propiedades presentan ciertas ventajas para la observación y la experimentación. Ciertos organismos se ven así privilegiados, y sobre ellos converge la atención de especialistas separados por la geografía, la disciplina e incluso los intereses. Existen dos clases de material particularmente favorables. Por un lado están los protistas, seres unicelulares cuyo ciclo reproductivo se parece al de los seres pluricelulares. En vez de unirse en un solo cuerpo, las células de los protistas están separadas y llevan una vida independiente. «Los protozoarios», dice R. Hertwig, «tienen una sola clase de reproducción: la división celular»[326]. Desde el punto de vista fisiológico, un protozoario constituye un individuo, al igual que un metazoario; sin embargo, por su morfología y su modo de formación, es comparable tanto a una célula germinativa como a una célula aislada de un metazoario. Los protozoarios constituyen un material simple e idóneo para el análisis de la división celular en su aspecto más puro y desnudo. Por otro lado, entre la infinita diversidad de los seres pluricelulares encontramos formas particularmente favorables para la observación del núcleo celular, de las células germinativas y del desarrollo embrionario. Entre estos seres privilegiados hay que seleccionar el material de acuerdo con la finalidad perseguida. Si nos interesa la división celular, la morfología del núcleo y su modo de formación, entonces deberemos recurrir al ascáride, gusano

[326] «Die Protozoen und die Zelletheorie», en *Archiv für Protistenkunde*, 1, 1902, pág. 1.

parásito del caballo cuyas virtudes destacaron Van Beneden y Boveri: «El ascáride constituye un material insuperable. Sus huevos pueden conservarse durante meses en un lugar frío y seco. Cuando se tiene tiempo para trabajar, se los coloca a la temperatura ambiental y continúan lentamente su desarrollo. Si se quiere acelerar temporalmente su desarrollo se pueden colocar en una estufa de cultivo. Si se quiere detenerlo se vuelven a poner en un lugar frío y siempre se recuperan en el estado en que se dejaron»[327]. Además, el núcleo del ascáride es muy simple, pues sólo contiene de dos a cuatro cromosomas, según la especie, cuya morfología y comportamiento son fácilmente observables. Durante la división celular los cromosomas se dividen y se distribuyen a lo largo de una suerte de huso que los atrae hacia polos opuestos de la célula. El ascáride es el organismo ideal para analizar este proceso. Pero si lo que queremos es estudiar las células germinales, la fecundación y el desarrollo del embrión, entonces hay que recurrir a la rana o, mejor aún, al erizo de mar, cuyas ventajas glosan Hertwig y Boveri: el óvulo es transparente y fácil de observar, y el espermatozoide es pequeño, con un núcleo condensado y fácilmente localizable. Se coloca un óvulo y un poco de esperma en una copa llena de agua de mar y se ve cómo los espermatozoides se fijan al óvulo. No obstante, dice Boveri, «sólo una célula espermática consigue su finalidad, la primera que toca la superficie del huevo»[328]. Se puede seguir el trayecto del núcleo masculino que va a unirse al núcleo femenino, y contemplar las divisiones sucesivas del huevo, que siguen un orden riguroso en el tiempo y en el espacio; en suma, se puede observar en detalle esa especie de milagro por el cual unos fragmentos desprendidos de dos individuos, uno macho y otro hembra, penetran el uno en el otro para dar nacimiento a un organismo nuevo e idéntico.

El huevo del erizo de mar permite que el estudio de la célula y del desarrollo embrionario pase de la observación a la experimentación. Se hace posible, en efecto, actuar sobre las células germinales o sobre el huevo en desarrollo, es decir, modificar las condiciones fisicoquímicas de la fecundación artificial. Agitando con fuerza huevos no fecundados, los Hertwig consiguen fragmentarlos en pedazos que pueden ser fecun-

---

[327] Citado en F. Baltzer, *Theodor Boyen*, Berkeley, 1967, pág. 121.

[328] *Ibid.*, pág. 70.

dados por el esperma de la misma especie. Mediante tratamientos químicos, Boveri logra huevos fecundados por más de un espermatozoide, y observa distribuciones anormales de cromosomas en las células en división. Aumentando la concentración salina en el agua de mar o sometiendo los huevos a distintos tratamientos químicos o físicos, Loeb induce la partenogénesis artificial. Aislando una célula de un huevo fecundado que ha empezado ya a segmentarse, Driesch obtiene un desarrollo completo que produce un organismo ciertamente pequeño, pero acabado. El virtuosismo técnico de los embriólogos continuará creciendo durante el siglo XX hasta el punto de permitirles intervenir sobre células seleccionadas del huevo, destruirlas selectivamente, inyectar ciertas sustancias (extractos de otros embriones, por ejemplo) y sustituir el núcleo de un huevo por otro. El efecto se mide por las lesiones que se desarrollan en el embrión, por el grado de desarrollo que alcanza y por las monstruosidades que aparecen. Incluso la formación del embrión se hace así accesible al método experimental.

La citología del siglo XIX trata primeramente de discernir el papel que desempeñan en el funcionamiento de la célula sus dos constituyentes principales, el núcleo y el citoplasma. Poco a poco el núcleo adquiere protagonismo, y dentro de él los cromosomas acaparan la atención. La constancia de su número y su morfología, la seguridad de sus movimientos, la precisión de su repartición en los productos de la división celular, todo contribuye a darles un estatuto excepcional. Se observa cómo se engrosan y luego se deshilachan y desaparecen para reaparecer después con la misma forma. Se observa cómo se dividen longitudinalmente en dos partes idénticas, cada una de las cuales es atraída hacia un polo celular, como por un «centro magnético», en palabras de Van Beneden. Los cromosomas manifiestan una continuidad a través del ciclo celular. Poseen una individualidad y una estructura característica en ciertas etapas del ciclo. «Son elementos orgánicos», dice Boveri, «que tienen una existencia autónoma en el interior de la célula»[329]. Pero, sobre todo, poseen el poder extraordinario de formar dos núcleos idénticos a aquél del cual derivan, desdoblándose y reagrupándose en cada polo celular. Los cromosomas pueden distinguirse y contarse, y se puede seguir su evolución.

[329] Citado en F. Baltzer, *Theodor Boyen*, pág. 68.

Se distribuyen por pares: dos grupos de dos en los ascárides, excepto en las células germinales, cuyos núcleos sólo albergan dos cromosomas diferentes. Al fundirse los núcleos de un óvulo y un espermatozoide en el momento de la fecundación se reconstituye el juego completo de cromosomas. Cualquier anomalía en el número de cromosomas así reconstituido, cualquier exceso o defecto, implica perturbaciones en la evolución del embrión. «El desarrollo normal», dice Boveri, «depende de una combinación particular de cromosomas, y eso sólo puede significar que los cromosomas, considerados individualmente, poseen cualidades distintas»[330]. En la profundidad del núcleo aparece una estructura de propiedades excepcionales, una estructura que tiene la propiedad, única en la célula, de desdoblarse con exactitud.

Al mismo tiempo, la dualidad constitucional observada primero en la célula se hace extensiva al conjunto del organismo. Hasta entonces no se hacía distinción entre los elementos estructurales y los encargados de la reproducción. El hijo representaba una excrecencia de los padres en la cual, a través de las células reproductoras, cada porción del cuerpo delegaba en una suerte de germen su reproducción exacta en la generación siguiente. La misma partícula formaba parte sucesivamente de la composición de un órgano paterno, de una célula reproductora y, finalmente, del mismo órgano en el hijo. «Es probable», decía Huxley, «que cada parte del adulto contenga moléculas procedentes del progenitor macho y del progenitor hembra, y que el organismo entero, considerado como una masa de moléculas, pueda compararse a un tejido en el que la trama deriva de la hembra y la urdimbre del macho»[331]. Pero la distinción que establece Nágeli entre el «trofoplasma» y el «idioplasma» introduce un dualismo en el conjunto del organismo. El trofoplasma, que constituye la mayor parte del cuerpo, se encarga de las operaciones de nutrición y crecimiento. El idioplasma, un componente comparativamente menor en volumen, desempeña en cambio un papel esencial en la reproducción y el desarrollo: es el sustrato de la herencia. Contenido en el huevo, dirige su evolución y su desarrollo, difundiéndose por todo el organismo para formar una suerte de trama directriz. Si el huevo de gallina difiere del

---

[330] Citado en E.B. Wilson, *The celi in developpement and Heredity*, 1925, pág. 916

[331] *Evolution*, en *Science and culture, Encycl. Bnitt.*, 1878, pág. 296.

huevo de rana es porque contiene un idioplasma diferente. La especie está contenida en el huevo tanto como en el organismo adulto. El idioplasma se concibe como una sustancia compleja formada por la conjunción de un enorme número de partículas o «micelas». Según un cálculo de Nágeli, un volumen de una milésima de milímetro cúbico contendría cerca de cuatrocientos millones de micelas. La distribución de estas micelas en el idioplasma asegura la especificidad del mismo. La reproducción de las formas a través de las generaciones ya no corre a cargo de delegados de cada parte del cuerpo reunidos en el huevo, sino de una sustancia particular que dirige el desarrollo. Entre los biólogos de la época, Nágeli era, sin duda alguna, uno de los que estaban en mejor disposición para interpretar la obra de Mendel. Es precisamente a él a quien Mendel comunicó sus resultados en una serie de cartas que, sin embargo, no tuvieron ninguna trascendencia.

A partir de Weismann, la distinción introducida por Nágeli no sólo se hace más acusada, sino que cambia de naturaleza. Ya no se refiere a sustancias difundidas en el cuerpo, sino a las células mismas. La reproducción pone en juego células de un tipo particular, las células germinales, que difieren de las que constituyen el cuerpo, las células somáticas, por su función, su estructura e incluso su papel en la evolución. De acuerdo con Weismann, las células germinales contienen una sustancia «cuya constitución fisicoquímica, incluida su naturaleza molecular, le otorga la facultad de convertirse en un nuevo individuo de la misma especie»[332]. La calidad de esta sustancia decide si el futuro organismo será lagartija u hombre, grande o pequeño, y si se parecerá a su padre o a su madre. La reproducción se basa enteramente en la naturaleza y las propiedades de las células germinales. Estas «carecen de importancia para la vida de sus portadores, pero sólo ellas conservan la especie»[333]. Esta discriminación entre la naturaleza de las células implica dos consecuencias importantes.

En primer lugar, la idea de que el hijo no es más que un brote de los padres no sólo queda invalidada, sino que se invierte. Según Weismann, mientras que las células somáticas sólo pueden formar células somáticas,

---

[332] *Essais sur l'hérédité*, trad. francesa, París, 1892, pág. 171.

[333] *Ibid.*, pág. 124.

las células germinales tienen la capacidad de originar células de los dos tipos. Las células germinales no pueden considerarse un producto del organismo. En las generaciones sucesivas de organismos, se comportan como un linaje de seres unicelulares que se reproducen por escisión. A lo largo de este linaje se diferencian las células somáticas. En cierto modo, los cuerpos de los animales se injertan lateralmente en ellas. Dice Weismann:

«En la reproducción de los seres pluricelulares tenemos el mismo proceso que caracteriza la reproducción de los seres unicelulares: una división continua de la célula germinal; la única diferencia es que la célula germinal no forma el individuo entero, sino que está rodeada… por miles de millones de células somáticas, cuyo conjunto forma la unidad superior del individuo»[334]. Puesto que las células germinales se reproducen por escisión, como los protozoarios, contienen siempre la misma sustancia hereditaria. Los organismos que se derivan de ellas son necesariamente idénticos entre sí. El linaje germinal forma el esqueleto de la serie en la que se insertan los individuos como excrecencias. Ya no es la gallina la que produce el huevo. Según la frase de Butler, es el huevo el que ha encontrado en la gallina el medio apropiado para rehacer un huevo.

La distinción entre germen y soma tiene otra consecuencia añadida. Si las células germinales derivan directamente de las de la generación precedente, si no son producidas por el cuerpo del progenitor, entonces están resguardadas de cualquier eventualidad somática. Las células germinales (y, por lo tanto, la descendencia) están a salvo de cualquier avatar que pueda sufrir un organismo. ¿Cómo pueden entonces transmitirse hereditariamente los caracteres adquiridos por un ser vivo? De ninguna manera, afirma Weismann: «Todos los cambios debidos a las influencias exteriores son pasajeros y desaparecen con el individuo»[335]. Son episodios transitorios que interesan a los organismos particulares, pero no a la especie. Los individuos implicados no tienen influencia sobre la trama de la especie. Al abrigo de cualquier aventura, las células germinales continúan reproduciéndose idénticas a sí mismas. El organismo no puede

[334] *Ibid.*, pág. 125.

[335] *Ibid.*, pág. 318.

adquirir ningún carácter al cual no esté hereditariamente predispuesto. En el huevo está determinado todo el futuro del individuo, sus formas y sus propiedades. El margen de maniobra que puedan tener las condiciones externas es «limitado y abarca sólo una pequeña región móvil alrededor de un punto fijo formado por la herencia»[336]. La naturaleza de las células germinales es constante dentro de la especie y varía de una especie a otra. Lo que se transforma y da lugar a la aparición de formas nuevas no son los individuos como tales, sino las «disposiciones hereditarias» contenidas en estas células. «La selección natural», dice Weismann, «opera en apariencia sobre las cualidades del organismo adulto, pero en realidad opera sobre las disposiciones ocultas en la célula germinal».

La concepción de la herencia sufre así una transformación total. Hasta entonces la posibilidad de heredar caracteres adquiridos nunca se había puesto seriamente en tela de juicio. Desde la antigüedad, todos los textos, ya fueran egipcios, hebreos o griegos, estaban llenos de historias en las que los resultados de incidentes sobrevenidos a los padres se perpetuaban en los hijos. Lamarck sistematizó esta relación para convertirla en el mecanismo de las transformaciones locales, la estratagema de las circunstancias que posibilita la adaptación íntima del organismo a su medio. La herencia de los caracteres adquiridos se entronca en toda una serie de supersticiones, en la generación espontánea, en la fecundidad de las hibridaciones interespecíficas, en fin, en todos los aspectos del viejo mito por el que se fundían en la creación el hombre, los animales y la tierra. Ninguna otra teoría se ha resistido tanto a la experimentación, y ninguna otra ha frenado tanto el análisis de lo viviente en general y de la reproducción en particular. Incluso para Darwin, que basaba la evolución en las fluctuaciones aparecidas espontáneamente en las poblaciones, la pangénesis dejaba sitio a una influencia directa de las condiciones externas sobre los caracteres hereditarios. Para Weismann, por el contrario, el medio no tiene ninguna influencia sobre la herencia. El linaje germinal está al abrigo de cualquier variación individual. Ninguna de las pretendidas transmisiones de caracteres adquiridos resiste un análisis riguroso. Ninguno de los organismos mutilados de generación en generación engendra una descendencia mutilada. Aunque desde su nacimiento se corte

[336] *Ibid.*, pág. 154.

sistemáticamente la cola de un linaje de ratones, los centenares de ratones nacidos al cabo de cinco generaciones seguirán teniendo una cola normal con la misma longitud media que la de sus antepasados. Lo que pueda acontecerle a un individuo no tiene influencia en su descendencia. La herencia está separada de cualquier fantasía local, de cualquier influencia, deseo o incidente. Se alberga en la materia y en su disposición. «La esencia de la herencia», dice Weismann, «es la transmisión de una sustancia nuclear de una estructura molecular específica»[337]. Sólo los cambios de esta sustancia, sus «oscilaciones», son capaces de provocar cambios duraderos en los seres vivos. El mecanismo de la herencia, de la variación, de la evolución, no se fundamenta en la persistencia de lo adquirido a través de las generaciones, sino en las virtudes de una estructura molecular.

Así pues, a finales del siglo XIX vemos aparecer dos elementos nuevos. Por un lado, la citología revela la existencia en el núcleo celular de una estructura con propiedades poco comunes. Por otro, el análisis crítico de la estabilidad de las especies y su variación lleva a atribuir la herencia a la transmisión de una sustancia particular. Todo indica que los cromosomas son los mejores candidatos para esta tarea: la constancia de su número y su morfología, la precisión de su división y su repartición durante la división celular, la reducción de su número a la mitad en las células germinales, su fusión en el huevo en el momento de la fecundación, en virtud de la cual el hijo recibe su lote de cromosomas del padre y de la madre a partes iguales. Únicamente la sustancia del núcleo es capaz de transportar la «tendencia hereditaria». Esta tendencia contiene no sólo las disposiciones de los progenitores, sino las de ancestros más lejanos. En efecto, cada una de las células germinales que se unen en la fecundación contiene de hecho cromosomas heredados de los abuelos, bisabuelos, etc. La sustancia heredada de generaciones sucesivas está representada en los cromosomas «proporcionalmente a su distancia en el tiempo, según una razón que va disminuyendo, de acuerdo con el cálculo aplicado hasta ahora por los criadores en el cruce de razas para determinar la fracción de sangre noble que contiene un descendiente determinado»[338].

337 *Ibid.*, pág. 176.

338 *Ibid.*, págs. 175-176.

Los cromosomas del padre constituyen la mitad de los del hijo, los del abuelo, una cuarta parte; los de la décima generación ancestral 1/1.024, y así sucesivamente. Las cuestiones de la herencia sólo requieren matemáticas elementales. En cada generación se renuevan los cromosomas procedentes de los progenitores. El análisis estadístico permite evaluar la contribución de los diferentes ancestros a la sustancia hereditaria del individuo. «En los fenómenos biológicos», dice de Vries, «la desviación de la media sigue las mismas leyes que las desviaciones de las medias de cualquier otro fenómeno regido por el puro azar»[339]. Todos los cuerpos, vivos o no, obedecen la ley estadística.

Es entonces cuando puede desarrollarse una ciencia de la herencia. Suele decirse que en el tránsito del siglo XIX al XX se «redescubrieron» las leyes de Mendel. Sin embargo, lo que se redescubrió es, sobre todo, el enfoque mecánico-estadístico de Mendel: la misma atención centrada en un número limitado de caracteres, con exclusión de los detalles; la misma selección de caracteres lo bastante diferenciados para introducir la discontinuidad; la misma manera de estudiar los descendientes de un cruzamiento, de contar los tipos y distribuirlos en clases finitas; el mismo interés por las poblaciones y no por los individuos cuya genealogía, sin embargo, se consigna; el mismo análisis estadístico de los resultados; la misma representación mediante símbolos factoriales; la misma distinción entre lo visible y lo oculto. En consecuencia, se observaron los mismos fenómenos, se sacaron las mismas conclusiones y se establecieron las mismas leyes. Tanto se generalizó el nuevo enfoque de la herencia que la obra de Mendel, ignorada durante más de treinta años, fue «redescubierta» simultáneamente en Alemania, Austria y Holanda y, algo más tarde, en Inglaterra, Estados Unidos y Francia. El progreso de la genética en los primeros años del presente siglo se debió a su importancia tanto para la biología como para la economía. Además de evolucionistas interesados en analizar el mecanismo de la variación, entre los investigadores de la herencia también había quienes buscaban aumentar el rendimiento agrícola y ganadero mejorando las variedades de plantas y animales; pero los métodos y problemas de unos y otros apenas diferían. Al esfuerzo de ganaderos y agrónomos, que disponían de medios considerables, se sumó

---

339 *Espèces et vaniétés*, trad. francesa, París, 1909, pág. 458.

el de los biólogos. Así se fundaron sociedades tales como la Asociación de Ganaderos Norteamericanos, cuyos objetivos definió así su presidente:

«[La asociación] ha sugerido que los biólogos abandonen durante algún tiempo los interesantes problemas de la evolución histórica y centren su atención en las necesidades de la evolución artificial. A los ganaderos, que obtienen beneficios financieros de la cría de seres vivos, les pide que de vez en cuando se paren a estudiar las leyes de la herencia. La asociación invita a ganaderos y biólogos a asociarse para su mutuo beneficio»[340]. Desde sus comienzos, el análisis genético se ha aplicado con frecuencia a organismos de gran importancia económica, como el trigo, el maíz, el algodón o los animales de granja.

Las cualidades del material tienen un papel muy importante en genética. Así lo reconoce de Vries: «Para el estudio de las leyes generales de la herencia es preciso excluir completamente los casos complejos y considerar la pureza hereditaria de los padres como una de las primeras condiciones de éxito. Además, es necesario que la progenitura sea numerosa, ya que ni la constancia ni las proporciones exactas en caso de inestabilidad pueden determinarse con un lote pequeño de plantas. Por último, para seleccionar definitivamente el material de investigación no hay que olvidar que el objetivo principal es establecer las relaciones que unen los descendientes con sus padres»[341]. Primero fueron los botánicos de Vries, Correns y Tschermak quienes redescubrieron el enfoque mendeliano. Las plantas se prestaban especialmente bien al estudio de la herencia, porque la agricultura producía grandes poblaciones, se podía manipular el proceso de fecundación y sus caracteres eran fáciles de discernir. El análisis se hizo luego extensivo a los animales de laboratorio, como el cobaya, el conejo y la rata. Sin embargo, la experimentación demandaba un material con virtudes excepcionales. Hacía falta un organismo lo bastante poco exigente para poderse criar sin dificultad en el laboratorio, lo bastante pequeño para poder manipular poblaciones importantes en un espacio reducido, y con una velocidad de reproducción lo bastante alta para que fuera posible observar la sucesión de numerosas generaciones en un

[340] *Proceedings*, vols. *1- 5,* 29 dic., 1903.

[341] *Espèces et variétés,* págs. 179-180.

plazo relativamente corto. Debía tener caracteres fáciles de observar, apareamientos frecuentes y fertilidad elevada. Sus células debían prestarse al examen microscópico y tener un número de cromosomas lo bastante reducido para detectar cualquier particularidad. Esta *rara avis* existe: es la mosca. Durante más de medio siglo, los genéticos van a examinar con fervor los ojos, alas y pelos de la Drosophila, la mosca popularizada por Morgan.

Las técnicas y los métodos adoptados por la genética le permiten analizar, por una parte, los mecanismos de variación en los seres vivos y, por otra, las características de la estructura que subyace tras la herencia. Cuando se consideran no unos cuantos individuos aislados, sino cientos o miles de plantas o animales, se hace posible ver cómo se modifican los caracteres de una población. En la segunda mitad del siglo XIX las variaciones nacían de la acumulación progresiva de cambios imperceptibles. Para Darwin, la herencia se transmitía mediante extractos de cada célula; para Weismann, a través de una sustancia nuclear; pero ambos coincidían en que las variaciones y la evolución se originaban en las fluctuaciones de cada carácter. La intensidad de un carácter nunca es rigurosamente idéntica de un individuo a otro en el seno de la especie, sino que puede acentuarse o atenuarse según los casos. En una población siempre habrá fluctuaciones, pero las «oscilaciones» de un carácter siempre giran alrededor de una media. Aun así, estas desviaciones pueden acumularse y generar variaciones importantes producto de una selección deliberada por parte de un criador o de la influencia de las condiciones del medio, siempre que la presión selectiva se ejerza en el mismo sentido. A principios del siglo XX la variación de los caracteres cambia totalmente de mecanismo. Para de Vries, la variación ya no es el producto de una serie de modificaciones insensibles, sino de cambios radicales: «Las especies no se transforman gradualmente, sino que se mantienen inalteradas generación tras generación hasta que, de pronto, surgen formas nuevas que difieren claramente de las paternas y que se mantienen en lo sucesivo tan perfectas, constantes, bien definidas y puras como cabe esperar de una especie»[342]. La naturaleza, por lo tanto, sí da saltos.

---

[342] *Ibid.*, pág. 18.

El medio del que se vale para producir variedades y especies nuevas es la mutación.

Al contrario de las fluctuaciones, los cambios insensibles y las gradaciones, las mutaciones son asequibles a la observación y la experimentación. Con un material mínimamente apropiado, que sea una cepa pura, y una población lo bastante numerosa se puede medir la frecuencia de mutación, precisar sus características y establecer las leyes que las rigen. Dichas leyes pueden resumirse con estas palabras: rareza, instantaneidad, discontinuidad, repetición, estabilidad, azar, generalidad. En primer lugar, la mutación es rara; la gran mayoría de individuos no se modifica con el paso de las generaciones. «La posibilidad de encontrar mutantes en número elevado», dice de Vries, «es muy reducida; lo normal es que representen una proporción muy pequeña del cultivo»[343]. Además, las formas mutantes surgen «de manera súbita», «inesperadamente», mostrando «todos los caracteres del nuevo tipo, sin intermediarios», con una «ausencia total de transición entre los individuos normales y las formas mutantes». Tienen una descendencia estable; las mutaciones se heredan y persisten a través de las generaciones. Las formas mutantes no manifiestan ninguna «tendencia a retornar gradualmente a la forma original». No aparecen una sola vez, sino que «los tipos se repiten regularmente en las generaciones sucesivas». Una mutación atañe a un solo carácter. Pero, sea cual sea el material estudiado y el carácter considerado, «las mutaciones son la regla». Por último, en las mutaciones no existe ninguna dirección privilegiada, ninguna relación entre su producción y la influencia de las condiciones externas, ninguna correlación entre su aparición y su utilidad. Sobrevienen por azar y representan tanto una «progresión» como una «regresión». Se dan «en todas las direcciones… ciertos cambios son útiles, otros perjudiciales, pero la mayoría carecen de importancia, no siendo ni ventajosos ni desventajosos»[344]. Todas las cualidades varían en todos los sentidos. De esta forma las mutaciones aportan «un material considerable para la criba de la selección natural».

El nuevo carácter de la variación justifica a posteriori el enfoque empírico adoptado en su momento por Mendel para analizar la herencia. La

---

[343] *Ibid.*, pág. 229.

[344] *Ibid.*, pág. 361.

discontinuidad introducida arbitrariamente por comodidad en la experimentación refleja en realidad la marcha de la naturaleza. Si un mismo rasgo puede presentar aspectos bien definidos, si éstos pueden representarse por una serie de símbolos, es porque el factor determinante del carácter adopta estados discretos. La modificación de dicho factor no se realiza a través de una serie de intermediarios, sino mediante cambios de estado bruscos. Al igual que los cambios materiales y energéticos, las variaciones hereditarias se realizan mediante saltos cuánticos. Se puede favorecer estos saltos y aumentar la frecuencia de mutaciones exponiendo el esperma de las Drosophilas a los rayos X, como hace Miller, o tratando los organismos con ciertos productos químicos. Pero, tanto si surgen «espontáneamente» como si son «inducidas artificialmente», las mutaciones son siempre aleatorias. Nunca se encuentra una relación entre su producción y las condiciones externas, ninguna dirección impuesta por el medio. Una vez excluida definitivamente toda transmisión de caracteres adquiridos, el análisis de las mutaciones precisa los papeles desempeñados por la herencia y por el medio en la formación de los seres vivos. El medio sólo puede influir en el organismo dentro de los estrechos límites de las fluctuaciones autorizadas por lo que Weismann llamaba la «estructura molecular de la sustancia hereditaria», que se convierte en el «material genético». Fuera de estos límites no existe organismo.

El otro aspecto del que se ocupa la genética es la exploración de la organización y el movimiento de lo que Mendel llamaba «factores», y que el danés Johannsen rebautizó como «genes». La experimentación accede a ellos a través de los fenómenos de hibridación. Pero, lejos de cruzar variedades de procedencia desconocida, en lo sucesivo se trabaja con variedades mutantes derivadas de un mismo linaje puro. Lo que se analiza entonces es el determinismo propio de la variación. A principios del siglo XX los caracteres, estudiados inicialmente en número reducido, dan lugar regularmente a segregaciones independientes, en consonancia con las observaciones de Mendel. Sin embargo, a medida que se amplía el análisis y aumenta el número y la diversidad de las mutaciones estudiadas, se manifiestan anomalías. Ciertos grupos de caracteres parecen «asociados», pues tienden a permanecer unidos a través de las sucesivas generaciones. Otros, por el contrario, parecen «rechazarse» mutuamente.

En los cultivos de Drosophilas de Morgan aparece toda una serie de mutaciones que modifican el color del ojo, el del cuerpo, o la forma de las alas. En el transcurso de las generaciones, estos caracteres permanecen ligados al sexo de los animales como por un lazo invisible. Para Morgan y sus colaboradores Bridges, Sturtevant y MulIer, todo ocurre como si los genes estuvieran fijados en estructuras lineales o «grupos de ligamiento». En la Drosophila, la genética distingue cuatro grupos de ligamiento y la citología cuatro cromosomas; combinando las técnicas pueden identificarse los primeros con los segundos. Incluso se puede asociar el sexo del animal con una de tales estructuras. A fin de cuentas, las diferencias hereditarias entre los individuos de una especie se distribuyen mediante el movimiento y reparto de los cromosomas, y por el intercambio de genes entre cromosomas homólogos. Los caracteres, una vez determinadas las frecuencias de ligamiento o separación en el curso de las generaciones, se sitúan en orden lineal a lo largo de los cromosomas como las cuentas de un rosario. Se hace posible estimar las distancias relativas entre los genes y construir los mapas genéticos de las especies.

Para el genético hay tres maneras de analizar la herencia: puede observar la función a través de los caracteres, la mutación en los cambios de éstos y la recombinación en sus reordenaciones. Cada uno de estos métodos le permite reducir el material genético a unidades. Pero, sea cual fuere el tipo de análisis empleado, el resultado final es el mismo: el gen representa a la vez la unidad de función, de mutación y de recombinación. De este modo el material de la herencia se descompone en unidades elementales que no pueden fraccionarse. Los genes se convierten en los átomos de la herencia. Aunque un gen pueda, por mutación, adoptar varios estados discretos, en cada cromosoma sólo está presente uno de ellos. Por su rigor y su formalismo, a los biólogos que observan a diario una suerte de continuidad en la variación les resulta muchas veces difícil admitir esta noción cuántica de la herencia. Sin embargo, concuerda con las concepciones de la física, puesto que las cualidades de lo viviente se encuentran así reducidas a unidades indivisibles y sus combinaciones sometidas a las leyes de probabilidad que rigen el azar. La misma imposibilidad de predecir el movimiento de un átomo o un electrón aislado impide predecir la combinación particular de genes que se formará en un

individuo particular. En cierta ocasión, la bailarina Isadora Duncan propuso a Bernard Shaw tener un hijo que podría combinar la belleza de la madre con la inteligencia del padre, a lo que el escritor opuso la otra posibilidad, igualmente probable, de ver nacer un vástago que, por desgracia, combinase la belleza del padre con la inteligencia de la madre. Únicamente pueden medirse distribuciones y calcularse probabilidades referidas a poblaciones grandes.

Entre los constituyentes de los seres vivos, el material genético interpreta un papel privilegiado; ocupa la cima de la pirámide y decide las cualidades del organismo. Los otros componentes se encargan de la ejecución. Sin embargo, sin el citoplasma que lo envuelve, el núcleo no tiene ningún poder. Es la célula entera la que constituye la unidad elemental de lo viviente, la que detenta las propiedades, la que asimila, crece y se reproduce. El gen representa el último término del análisis genético, pero carece de autonomía. Su expresión depende casi siempre de los otros genes que lo acompañan. Lo que determina el desarrollo, la forma y las propiedades de un organismo es la totalidad del material genético, la combinación particular de genes que en él se realiza. La selección natural actúa sobre las poblaciones favoreciendo la reproducción de ciertos individuos, y a través de ello, tras un gran rodeo, termina afectando al propio material genético. Esto lo consigue actuando a tres niveles. En primer lugar sobre el carácter, es decir, sobre el propio gen: se favorece aquel estado que, de alguna manera, confiere alguna ventaja para la reproducción. En segundo lugar sobre el individuo considerado como un conjunto de genes: ciertas combinaciones tienen más posibilidades de tener descendencia. En tercer lugar sobre la especie, que puede concebirse como la suma de todos los genes contenidos en todos los individuos que la constituyen: la aparición de nuevos genes por mutación y de nuevos conjuntos por recombinación dan lugar a formas nuevas de las que la selección natural extrae las especies nuevas. A través de una suerte de ciclo, el sustrato de la herencia acaba siendo también el de la evolución.

La genética clásica pertenece al dominio de la biología que tiene por objeto de estudio el organismo entero o las poblaciones de organismos. No persigue disociar el animal o la planta para identificar sus constituyentes y estudiar su funcionamiento. El método de análisis que utiliza se

conoce como el «método de la caja negra». El organismo se considera una caja cerrada que contiene una maquinaria muy compleja y en cuyo interior tienen lugar cadenas de reacciones que se entrecruzan y se superponen en todas las direcciones. Cada una de estas cadenas aflora a la superficie de la caja por una de sus extremidades, el carácter. La genética no intenta abrir la caja para desmontar sus engranajes; se contenta con examinar la superficie para deducir el contenido. A través del carácter visible pretende localizar la extremidad invisible de las cadenas de reacciones, revelar la estructura que, en lo más hondo de la caja, dirige la forma y las propiedades. En cuanto a los engranajes intermediarios que van del gen al carácter, la genética los ignora totalmente. Este tipo de análisis conduce en definitiva a una representación extremadamente simple. Simplicidad en la mecánica a la que está sometido el material genético, como lo simboliza el movimiento de los cromosomas, con su división, su separación y su reordenación. Simplicidad también en la estructura misma, puesto que la disposición de los genes se representa por la figura más elemental: la línea recta. El gen propiamente dicho, el elemento de la herencia, aparece como una estructura tridimensional de una complejidad temible e inaccesible a la experimentación. Sin embargo, para describir lo que sostiene las formas, las propiedades y el funcionamiento de un ser vivo en su conjunto, es difícil imaginar otro modelo más simple que el de un segmento de collar de perlas. Todas las variaciones de caracteres y todas las mutaciones corresponden a cambios en la naturaleza o el orden de las perlas. En pocos años, la teoría del gen transformó la representación del mundo vivo. Tanto las propiedades de los animales y las plantas como su variación reposan en última instancia sobre la permanencia de una estructura alojada en la célula y sobre sus prestaciones. No obstante, el método de la caja negra tiene sus límites. Aunque a principios de siglo permitió formalizar la herencia, representarla por un sistema de signos simples y someterla al tratamiento matemático, al desinteresarse por los engranajes deja un vacío entre el gen y el carácter. A base de símbolos y fórmulas, la genética compone una imagen del organismo cada vez más abstracta. El gen, ente de razón, se presenta como una entidad sin cuerpo, sin densidad, sin sustancia. Se hace necesario sustituir esta concepción abstracta por un contenido concreto. La mecánica de la herencia requiere la presencia en los cromosomas de

una sustancia dotada de dos raras virtudes: el poder de reproducirse con exactitud y el de influir a través de su actividad en las propiedades del organismo. Encontrar la naturaleza de esta sustancia, explicar el modo de acción de los genes, llenar el vacío entre gen y carácter, fueron los objetivos que se marcaron los genéticos a mediados de siglo. Sin embargo, ni el enfoque ni el material ni los conceptos de la genética se prestan a dicho análisis. Para acceder a los detalles de la estructura que regula la herencia no basta con observar unos cuantos caracteres, seguir las recombinaciones a través de las generaciones y medir las frecuencias de asociación. Se necesita una cooperación entre la genética y la química.

## Las enzimas

En oposición a la genética, la química de los seres vivos pertenece a la rama de la biología que intenta reducir el organismo a sus constituyentes elementales. Durante la segunda mitad del siglo XIX, la química orgánica delimitó su dominio. Ahora tiene que definir su posición en relación a la química mineral y precisar la naturaleza de los compuestos que estudia, así como el mecanismo de las reacciones propias de los seres vivos. Hasta entonces, los químicos orgánicos se esforzaban sobre todo por identificar la enorme variedad de compuestos que aislaban y luego analizaban. Todas estas sustancias se caracterizaban por la presencia de carbono. No obstante, todos esos compuestos podían clasificarse de acuerdo con un abanico de criterios: según su tamaño, había moléculas enormes y otras eran muy pequeñas; según su naturaleza, se distinguían los azúcares, las grasas y las sustancias albuminosas; según su papel, se distinguía entre sustancias plásticas y metabólicas; según su función, se distinguían alcoholes, aldehídos, éteres, etc. A la lista, ya larga, se sumaban continuamente sustancias nuevas, como el ácido rico en fósforo aislado por Miescher en la misma época en que Mendel experimentaba sobre la hibridación de los guisantes; su localización en el núcleo celular le valió el nombre de ácido nucleico, pero no se le encontró ninguna función. El análisis se limitaba casi siempre a extraer los compuestos a partir de productos naturales, a aislarlos, a modificar su ordenación para poner en evidencia lo más sutilmente posible los enlaces entre los elementos. Los químicos eran capaces de descomponer las sustancias orgá-

nicas, pero no sabían cómo reconstituirlas. De hecho, se negaban a sí mismos toda posibilidad de síntesis. Las transformaciones que acompañaban el flujo de materia a través de un ser desafiaban las leyes de la química mineral. Para desplazar con tanta precisión los átomos o los radicales, para guiar tan certeramente cada elemento hacia su posición en la molécula, para producir tan fielmente compuestos específicos, se necesitaba algo distinto de las fuerzas que se manejaban en el laboratorio: se necesitaba una fuerza vital. Situada en el límite entre lo viviente y lo inanimado, la química orgánica erigía aquí una barrera que parecía infranqueable.

Sin embargo, poco a poco el enfoque de la bioquímica va cambiando y la necesidad de recurrir a una fuerza que escapa a las leyes de la física se va desvaneciendo. Los obstáculos erigidos entre la química orgánica y la química mineral se desmoronan uno tras otro. En primer lugar, los conceptos de energía y de equivalencia asumen el papel que hasta entonces había interpretado la fuerza vital. Hay energía en la estructura misma de un compuesto químico, es decir, en las fuerzas que enlazan los átomos de una molécula. Al romperse estos enlaces y reorganizarse nuevamente los átomos en una estructura nueva con enlaces más débiles, el exceso de energía aparece en forma de calor, luz, electricidad o movimiento. Se puede calcular la energía contenida en un compuesto y medir la cantidad de calor liberada por una reacción. Cuando se quema carbón, por ejemplo, se rompen los lazos que unían los átomos de carbono por un lado y los de oxígeno por otro, de manera que ambas clases de átomos pueden entonces ligarse entre sí. Sin embargo, la energía contenida en los enlaces del gas carbónico así formado es menor que la contenida en los enlaces que unen los átomos de carbono en el carbón. Cuando un organismo consume glucosa, sólo una fracción de ésta se transforma en compuestos orgánicos específicos. El resto se quema, es decir, se combina con el oxígeno liberando, además de gas carbónico y agua, energía. Ésta puede perderse en forma de calor o bien reutilizarse en otras reacciones químicas. En los seres vivos, las transformaciones químicas se realizan a través de reacciones acopladas que permiten una transferencia de energía. Junto al flujo de materia que atraviesa el organismo circula también un flujo de energía. Ya no es necesario, sentencia Helmholtz, recurrir a ninguna fuerza vital: «Existen quizás en el cuerpo vivo otros agentes además de

los que actúan en el mundo inorgánico; pero estas fuerzas, en tanto que ejercen una influencia química y mecánica en el cuerpo, deben tener el mismo carácter que las fuerzas inorgánicas…; no puede haber ninguna elección arbitraria en la dirección de sus acciones»[345]. A partir de la termodinámica se constituye una fisicoquímica que calcula la energía utilizable de los compuestos, determina la velocidad de las reacciones y mide sus equilibrios. Poco a poco, las reglas de la química mineral se hacen extensivas a los compuestos orgánicos. Para toda una serie de fenómenos biológicos se verifica el juego del equilibrio químico y de la «acción de masas». Las leyes de la dinámica química son las mismas para todos los cuerpos, tanto en los seres vivos como en el laboratorio.

El segundo tema que contribuye a la unificación de la química orgánica y la química mineral es la síntesis de compuestos orgánicos a partir del carbono. Hay varias maneras posibles de producir un compuesto en el laboratorio. Se puede hacer manipulando otras sustancias, dividiendo un compuesto más complejo o añadiendo fragmentos a un cuerpo más simple. También se puede construir toda la arquitectura de la molécula a partir de sus elementos. Para el químico, sólo se puede hablar de «síntesis completa» en este último caso. Sin embargo, hasta entonces la posibilidad de aplicarla a los constituyentes de los seres vivos parecía quedar excluida. En los compuestos orgánicos se encontraban elementos en cantidad tan limitada, pero en proporciones tan rigurosas y en combinaciones tan variadas que estas sustancias parecían fuera del alcance de una síntesis en el laboratorio. Todos los esfuerzos para reproducir los juegos de la naturaleza con el arte del químico habían fracasado. Es cierto que Wöhler había logrado producir urea y ácido oxálico, y Kolbe los ácidos salicílico y acético; pero, por un lado, se trataba de reacciones excepcionales y no de un método sintético de aplicación general, y, por otro lado, en todos los casos se partía de un compuesto que ya era un derivado del carbono. Incapaz de combinar el carbono con el hidrógeno, la química consideraba infranqueable el obstáculo entre lo orgánico y lo mineral. Sólo la fuerza vital era capaz de oponerse a la corriente de las fuerzas que actuaban sobre la materia. Según Liebig, el químico orgánico no

---

345 *The conservation of forces applied to organic nature*, en Proc. Royal Institution, 12 de abril de 1861.

tenía ninguna obligación de verificar por la síntesis los resultados del análisis.

En la segunda mitad del siglo, la cuestión de las síntesis orgánicas se plantea en términos diferentes. Para Berthelot, se hace necesario «formar los compuestos orgánicos a partir de elementos, sobre todo aquellos que poseen funciones particulares distintas de las propias de los compuestos conocidos en química mineral»[346]. Ya no se trata de obtener algunos compuestos por procedimientos excepcionales. Lo que interesa es poner a punto un método que permita producir los compuestos orgánicos más diversos, recorrer la serie entera. Esto es posible porque la química orgánica se fundamenta en las propiedades del carbono. «Los compuestos orgánicos», dice Berthelot, «pueden clasificarse según ocho funciones o tipos fundamentales que comprenden todos los compuestos conocidos hasta la fecha y todos los que podemos esperar obtener»[347]. Estas ocho funciones pueden agruparse a su vez según el número de elementos asociados al carbono. Existe así una primera clase formada por los compuestos de dos elementos solamente, los carburos de hidrógeno; una segunda clase de cuerpos con tres elementos —carbono, hidrógeno y oxígeno— que agrupa cuatro funciones: alcoholes, aldehídos, ácidos y éteres; una tercera clase de compuestos nitrogenados que incluye dos funciones: álcalis y amidas; la última clase incluye la función de los «radicales metálicos compuestos», que contienen metales fijados sobre ciertos éteres. El orden de complejidad impone el de la síntesis, puesto que la dificultad principal reside en la primera etapa, cuando se obliga al carbono a establecer nuevas uniones con otros elementos, en particular con el hidrógeno. Una vez formados los carburos de hidrógeno, todas las demás funciones pueden derivarse de ellos. Sin embargo, la asociación del carbono con otros elementos no constituye una operación puramente empírica. Tiene un fundamento teórico que se basa en el concepto de valencia. Según Kékulé, lo que distingue al carbono y le otorga una posición única en el mundo viviente es su «tetravalencia». Cada átomo de carbono tiene la capacidad de formar cuatro uniones con otros átomos, uniones que serán «saturadas» o «no saturadas» por otros elementos. Una serie de seis

---

346 *La synthèse chimique*, 1897, pág. 203.

347 *lbid.*, pág. 215.

átomos de carbono unidos dos a dos puede formar una cadena que se cierra sobre sí misma en un «ciclo» o «núcleo aromático». La tetravalencia del carbono hace posible precisar la posición respectiva de los átomos en un compuesto, caracterizar los enlaces entre ellos, definir los isómeros según su distribución espacial; en suma, representar cualquier molécula orgánica mediante un sistema de símbolos y predecir sus propiedades químicas. A partir de ahí pueden deducirse las leyes generales que rigen la hidrogenación del carbono y las proporciones de los elementos necesarios para obtener un compuesto dado. Por efecto de una descarga eléctrica o del calor, el carbono se une directamente al hidrógeno para producir los hidrocarburos más simples como el acetileno o el etileno. A través de una serie de sustituciones se puede llegar a sintetizar paso a paso el conjunto de los carburos de hidrógeno. Estos métodos, dice Berthelot, «son generales y permiten formar todos los carburos a partir de sus elementos; se establece así la unión definitiva entre la química orgánica y la química mineral, ambas procedentes de los mismos principios de mecánica molecular»[348]. Los hidrocarburos representan los esqueletos carbonados que pueden incorporar, por simple fijación de hidrógeno y agua, las demás funciones, bien directamente transformando un carburo en alcohol, aldehído, ácido, etc., bien indirectamente formando primero un alcohol que enseguida se transforma en aldehído, ácido, etc. De este modo, a partir de los elementos, bajo la sola influencia de las «afinidades químicas» y de fuerzas físicas como la electricidad o el calor, y por métodos de laboratorio, se llega a producir una gran cantidad de compuestos orgánicos naturales. Esta síntesis, que remeda los mecanismos que rigen en vegetales y animales, lleva a Berthelot a afirmar que «en contra de las antiguas opiniones, los efectos químicos de la vida resultan del juego de las fuerzas químicas ordinarias, del mismo modo que los efectos físicos y mecánicos de la vida se derivan de fuerzas puramente físicas y mecánicas. En ambos casos las fuerzas moleculares puestas en juego son las mismas, puesto que tienen como resultado los mismos efectos»[349]. Pero los químicos no se contentan con imitar la naturaleza y reproducir sus compuestos. También pueden crear cuerpos inéditos, sustancias inexistentes pero parecidas

---

[348] *Ibid.*, pág. 240.

[349] *Ibid.*, pág. 272.

a los productos naturales y que participan de sus propiedades. Se materializan así, de alguna manera, las leyes abstractas que persigue la química. Ya no se trata sólo de imaginar las transformaciones que hubieran podido producirse alguna vez en la química de los seres. Podemos pretender, dice Berthelot, «concebir los tipos generales de todas las sustancias posibles y realizarlas…, formar de nuevo todas las materias que se han desarrollado desde el origen de las cosas, en las mismas condiciones, en virtud de las mismas leyes, según las mismas fuerzas de la naturaleza que posibilitaron su formación»[350]. Ya no hay límite teórico alguno para la química orgánica.

Finalmente, y como consecuencia de un giro sorprendente que lleva a la química a inmiscuirse en un campo antes reservado a los naturalistas, desaparecerá toda distinción entre reacciones en vivo y reacciones en el laboratorio. En efecto, son los métodos de la química los que revelan el papel de los microorganismos en este mundo, además de borrar las últimas trazas de la generación espontánea. Hasta ese momento las sustancias orgánicas se caracterizaban por su composición y sus funciones químicas. Hacia el fin del siglo aumenta la importancia de la estructura molecular y de la posición relativa de los átomos, ya que ciertos cuerpos, llamados isómeros, aun teniendo idéntica composición se diferencian en sus propiedades. La especie química, dice Pasteur, «es la colección de todos los individuos idénticos en cuanto a naturaleza, proporción y ordenación de sus elementos; todas las propiedades de los cuerpos son una función de estos tres términos»[351]. Ciertas características ópticas de los cuerpos se pueden ligar a su «disimetría molecular», con lo que el análisis cuenta con una nueva arma. Pero entonces surge la imposibilidad de reproducir en el laboratorio la disimetría que se observa en los productos naturales. Todos los productos artificiales, dice Pasteur, «tienen imágenes superponibles; por el contrario, la mayoría de productos orgánicos naturales…, los que tienen un papel esencial en los fenómenos de la vida vegetal y animal, son disimétricos»[352]. Así pues, los compuestos propios de los organismos poseen una cualidad que los distingue de esos mismos

---

[350] *Ibid.*, pág. 277.

[351] *Dissymétrie moléculaire; Oeuvres*, 1, 1922, pág. 327.

[352] *Ibid.*, pág. 564.

compuestos cuando son producidos en el laboratorio. En todos los seres vivos existe, por lo tanto, una fuerza de origen desconocido que introduce una disimetría en las actividades químicas y que no se puede imitar en el laboratorio. A través de esta disimetría la química se introducirá en el mundo de los seres microscópicos, por mediación de las fermentaciones. Toda fermentación pone en juego dos factores, uno pasivo y otro activo. El primero es la sustancia fermentable (azúcar, por ejemplo) que sufre una transformación bajo la influencia del segundo, el fermento, factor nitrogenado de naturaleza «albuminoide». Para Liebig, el poder fermentador era la propiedad de ciertas sustancias orgánicas en estado de «metamorfosis» y capaces de transmitir este carácter a las sustancias vecinas. Para Berzelius, en cambio, era una propiedad «catalítica» que confería a una sustancia la capacidad de transformar otra sin intervenir ella misma en la transformación. En todos los casos, el papel de fermento correspondía a una sustancia albuminosa a la que alguna fuerza misteriosa confería la capacidad de actuar por contacto sobre los cuerpos fermentables. En todos los casos, el poder fermentador era un carácter no del ser vivo en su totalidad, sino de algunos de sus constituyentes. La interpretación de estos fenómenos cambia completamente a partir de Pasteur. Si los seres vivos introducen en las reacciones químicas una disimetría molecular, ésta, como contrapartida, señala la presencia de un ser vivo. Aquí se invierte el proceder usual de la ciencia. Lo habitual es que la ciencia proceda del conocimiento teórico a las cuestiones prácticas, pero en este caso sigue el camino opuesto. Las industrias productoras de cerveza, vino y licores proporcionan a Pasteur la oportunidad de asociar íntimamente la práctica biológica a la química. Las desviaciones de las fermentaciones, las «enfermedades» de la cerveza o el vino, provocan la formación de compuestos disimétricos, lo que indica la presencia de seres vivos. Para Pasteur, lo anormal, lo patológico, no proporciona un modelo que sirva para reproducir la fisiología, sino que constituye un punto de partida para la experimentación. Señala un fenómeno que el análisis transforma en proceso fisiológico. Las anomalías de una fermentación se convierten simplemente en otras formas de fermentación. Ya sea alcohólica, amílica, «viscosa», acética, láctica, butírica, etc., cualquier fermen-

tación conlleva la multiplicación de seres microscópicos. «Los verdaderos fermentos», dice Pasteur, «son seres organizados»[353]. Además, a cada tipo de fermentación corresponde un tipo particular de organismo que se puede aislar, cultivar y estudiar. Para un sustrato dado, la especificidad del organismo determina la de las reacciones químicas y, en consecuencia, la de la fermentación. Esto no significa que una misma sustancia no pueda fermentar por la acción de organismos diferentes, ni que un mismo organismo no pueda fermentar varias sustancias. De hecho, en una fermentación se produce todo un espectro de compuestos; y es el conjunto del espectro lo que caracteriza al organismo. «Cada fermentación», dice Pasteur, «tiene una ecuación que se le puede asignar de manera general, pero que, en el detalle, está sometida a las mil variaciones que comportan los fenómenos de la vida»[354]. Tanto la fermentación por microorganismos como la nutrición de los animales reflejan las actividades químicas, el metabolismo, del ser vivo.

Puede verse cuánto difiere esta postura de las precedentes. No sólo modifica la naturaleza de las relaciones entre biología y química, sino también la representación del mundo vivo en general, las relaciones que se tejen entre los seres y el reparto de papeles en las actividades químicas que se desarrollan en este planeta. De pronto, el mundo invisible revelado por la invención del microscopio, inexplorado y casi ignorado desde finales del siglo XVII, tiene ya un sitio, un significado y una función atribuibles. El enfoque de Pasteur se basa en dos factores distintos que desarrolla en paralelo. Por un lado está la especificidad del microorganismo que impone la naturaleza de las reacciones de fermentación, del mismo modo que la causa engendra el efecto. El concepto de especificidad se extiende entonces a un campo imprevisto, el de la patología: toda una serie de enfermedades en el hombre y los animales se convierten en la consecuencia de la invasión del organismo por un «germen» particular. Tal es la confianza en la validez de este principio que se aplica incluso a casos en los que no es posible ver ni cultivar en un tubo de ensayo los agentes causales (que luego se conocerán como virus). No hace falta señalar la importancia que ha tenido desde entonces el concepto de infec-

---

[353] *Fermentations et générations dites spontanées; Oeuvres,* II, pág. 224.

[354] *Etudes sur la bière; Oeuvres,* V, pág. 216.

ción por bacterias y de virus en la medicina, humana o veterinaria, y en la agricultura.

Por otro lado está la correlación que se establece entre los efectos químicos ejercidos sobre sustancias externas u organismos y el carácter viviente del factor en juego. Podemos entonces dar la vuelta al problema de las fermentaciones y formular la cuestión en otros términos: «Una de las dos cosas es cierta: si sólo el oxígeno, en tanto que oxígeno, por su contacto con las materias nitrogenadas, da nacimiento a los fermentos responsables de las fermentaciones propiamente dichas, entonces estos fermentos son generaciones espontáneas; si estos fermentos no son seres espontáneos, entonces este gas no interviene en su formación en tanto que oxígeno, sino como estimulante de un germen que se introduce junto con el oxígeno en las sustancias nitrogenadas o fermentables o que ya estaba presente en ellas»[355]. Repitiendo las antiguas experiencias de Spallanzani, perfeccionándolas y ejecutándolas con el rigor del químico, Pasteur excluye definitivamente toda posibilidad de generación espontánea: incluso en el mundo microscópico el ser vivo sólo nace del ser vivo. Si hay bacilos, éstos sólo pueden provenir de al menos un bacilo idéntico.

Sin embargo, aunque se haya exorcizado el demonio de la generación espontánea, queda el del vitalismo, que adquiere un vigor renovado. El final del siglo XIX se encuentra frente a una paradoja: por un lado, tanto el análisis de las reacciones y de su equilibrio como las operaciones de síntesis niegan toda singularidad a la química de los seres vivos; por otro lado, la cristalografía otorga una cualidad particular a los constituyentes de lo viviente y la microbiología considera el poder fermentador una propiedad exclusiva de los seres organizados. Este hecho genera polémicas interminables y cargadas de pasión. Por otra parte, se conocía desde hace tiempo la existencia de «diastasas» solubles capaces de provocar, en un tubo de ensayo y en ausencia de cualquier organismo, la degradación de ciertos azúcares o ciertos compuestos albuminosos. Es preciso, por lo tanto, distinguir entre dos clases de fermentos, según estén o no «organizados». Pero al comenzar el siglo XX los químicos están ya en disposición de resolver este problema. Se trituran las células, se obtienen extrac-

[355] *Ibid.*, pág. 224

tos y se investigan los fermentos que contienen. Machacando con arena una masa de levadura seca, Büchner constató que el «jugo de levadura» extraído de cualquier célula viva por filtración puede aún provocar la fermentación de la glucosa en alcohol. Para Büchner, «esto demuestra que los procesos de fermentación no exigen el complicado equipamiento que supone la célula de levadura. Es verosímil que el agente del jugo activo en la fermentación sea una sustancia soluble y, sin duda, albuminosa»[356]. Todos los fermentos conocidos se comportan, por lo tanto, del mismo modo. Todos son sustancias y no seres vivos. Todos pueden actuar fuera del organismo. A partir de aquí se revelan las actividades catalíticas más variadas: los químicos hallan diastasas que atacan específicamente las grasas, otras sólo ciertos azúcares, y otras sólo las sustancias albuminosas. Con el desarrollo de la fisicoquímica, sin embargo, la catálisis pierde mucho de su misterio. Se miden los parámetros de una reacción química, su velocidad, su equilibrio y su reversibilidad. El efecto catalítico sólo influye en uno de esos parámetros: la velocidad. La catálisis, como la temperatura, incrementa la velocidad de reacción. Ostwald define los procesos catalíticos como «aquellos procesos en los que la velocidad de la reacción cambia, debido a la presencia de cuerpos que se encuentran al final de la reacción en el mismo estado que al principio; estos cuerpos modifican solamente la velocidad de la reacción, pero no intervienen en su fórmula»[357]. Los efectos catalíticos no se restringen a la química de lo viviente. Se conocen cuerpos minerales (metales pesados como, por ejemplo, la viruta de platino) que catalizan toda una serie de reacciones en el laboratorio. La diferencia principal entre estos catalizadores minerales y las diastasas es la especificidad de estas últimas, cada una de las cuales cataliza una reacción concreta. Desaparece así el obstáculo que, desde Lavoisier, limitaba el análisis de las reacciones en los seres vivos, y se hace posible someter los procesos del organismo a las leyes de la dinámica química.

La experiencia de Büchner de la fermentación de la glucosa en etanol por un extracto sin células inaugura una nueva química. La importancia

---

[356] *Berichte deutsche chemische Gesellschafl,* vol. 30, 1897, págs. 117-124; trad. inglesa en *Great Experiments in Biology*, pág. 28.

[357] *Lehrbuch der aligemeinen Chemie*, II, 1902, pág. 248.

del trabajo de Büchner no reside sólo en la nueva luz que aporta a la química de lo viviente sino, sobre todo, en la vía que abre al análisis químico. Cuando se trabaja con tejidos o células enteras resulta muy difícil, a veces imposible, hacer penetrar ciertos compuestos a través de la membrana celular. Con los extractos, en cambio, resulta relativamente fácil intervenir en una reacción: se pueden añadir compuestos susceptibles de influir en la reacción, eliminar otros e investigar inhibidores. No es exagerado decir que, desde entonces, el análisis de extractos celulares se ha convertido en el método principal de los químicos que estudian los seres vivos. De esta forma se individualiza, a principios de siglo, una rama nueva de la química: la química biológica. La química orgánica continúa interesándose por el conjunto de los derivados del carbono, estudiando sus propiedades y produciendo nuevos cuerpos por síntesis. La química biológica, por el contrario, se centra en el análisis de los constituyentes de los seres vivos y sus transformaciones en relación con el funcionamiento del organismo. Situada en el corazón mismo de la biología, la química biológica se relaciona con las otras disciplinas que analizan los diferentes aspectos de los seres. Sin embargo, se distingue de ellas por sus métodos, sus objetivos y su concepción del organismo. Para la química biológica, cuando se destruye la organización de un ser desaparece la vida, pero no en todas sus manifestaciones. La disociación del organismo interrumpe fenómenos como la reproducción o el crecimiento, pero otros, como la fermentación, prosiguen. El papel de la química biológica consiste, dice Loeb, en «distinguir las funciones que dependen de la constitución química de aquellas que suponen además una estructura física particular de la sustancia viva»[358].

En los inicios de la química biológica pueden discernirse dos corrientes. La primera intenta precisar la naturaleza del contenido celular en su conjunto y analizar el «protoplasma» en términos fisicoquímicos. En esta época, el límite estructural viene dado por el poder resolutivo del microscopio óptico. En la célula se perciben estructuras tales como el núcleo, la membrana, las mitocondrias, etc. El «protoplasma» no tiene una auténtica estructura. Es una especie de emulsión, una suspensión de gránulos o «micelas» en un líquido, un coloide. Así lo afirma Loeb: «Las sustancias

[358] *La Dynamique des phénomènes de la vie*, trad. francesa, París, 1908, pág. 65

que componen la materia viva, ya sean líquidos o sólidos, son coloides»[359].

Los coloides, en oposición a los cristaloides, no son patrimonio de lo viviente, pues se pueden preparar en el laboratorio; una suspensión de partículas de oro o platino en agua, por ejemplo, es un coloide. Este tipo de suspensión posee cualidades especiales —estabilidad, superficie activa, cargas eléctricas— que favorecen las reacciones químicas y contribuyen a la catálisis. Los cuerpos albuminosos y las grasas extraídos de organismos diversos producen fácilmente soluciones coloidales. A fin de cuentas, por encima de la variedad de estructuras visibles en los seres vivos, a simple vista o al microscopio, la naturaleza coloidal del protoplasma es la que da a las células su carácter propio. «La vida», dice Loeb, «está ligada a la persistencia de ciertas soluciones coloidales. Los agentes que hacen pasar todos los coloides al estado de gel acaban también con la vida»[360]. Es lo que ocurre cuando se coagulan las albúminas por la acción del calor o de ciertos metales. Si se pudieran destruir las estructuras visibles respetando la naturaleza coloidal del protoplasma, debería ser posible analizarlo. Sin embargo, los medios de estudio a principios de siglo son todavía insuficientes. Sólo el desarrollo de los métodos físicos, en particular la ultracentrifugación, permitirá interpretar el contenido de la célula no ya en términos de coloides, sino de moléculas.

La segunda corriente de la bioquímica se centra en el análisis de los constituyentes y las reacciones celulares, siguiendo la vía abierta por Büchner. Se trata, en primer lugar, de precisar las diferentes etapas de la degradación de la glucosa por la levadura. Pero muy pronto el estudio se amplía a otras reacciones, y este tipo de análisis bioquímico experimenta un desarrollo considerable a principios de siglo. Una vez identificado un fenómeno, la bioquímica se esfuerza por precisar las reacciones, aislar los constituyentes en juego y purificarlos para analizar su naturaleza y funcionamiento, con vistas a reconstruir el conjunto que ha destruido, reunir los cuerpos que ha separado, para formar un «sistema» del que se puedan estudiar las propiedades, medir los parámetros y precisar las exigencias. La reacción puede representarse entonces con los símbolos

[359] *Ibid.*, pág. 74.

[360] *Ibid.*, págs. 79-80.

de la química. Al reducir los seres vivos a sus constituyentes y estudiar los compuestos aislados, sus características y sus interacciones, la bioquímica se opone a la mayoría de las disciplinas biológicas. Estas la acusan de estudiar objetos que ya nada tienen que ver con los seres vivos, de crear artefactos y de querer explicar el funcionamiento del todo sólo por el de las partes; en fin, de sacar conclusiones falsas de su análisis. Mal pertrechada para resistir este tipo de críticas, la química biológica se esfuerza no obstante por evitarlas, para lo cual, en cada etapa de su análisis, compara los fenómenos estudiados en el tubo de ensayo con lo que ocurre en el organismo.

Los bioquímicos preparan sus extractos a partir de tejidos animales o cultivos de microorganismos. Ciertos materiales, como el hígado de rata, el músculo de palomo o la suspensión de levaduras, constituyen un material privilegiado por su facilidad de obtención y de manejo. Lo que se busca en los extractos es identificar moléculas y desencadenar reacciones. De acuerdo con su naturaleza, las sustancias que componen los tejidos vivientes pueden clasificarse en tres categorías: azúcares o sacáridos, grasas o lípidos, y albuminoides o proteínas. Dentro de cada clase hay moléculas grandes y pequeñas. Inestables y difíciles de aislar y caracterizar, las moléculas grandes, en particular las proteínas, no son todavía verdaderos objetos de análisis. Ni los medios ni los conceptos disponibles permiten tratarlas de la manera apropiada. Las moléculas pequeñas sí se prestan a los métodos de la química orgánica. Se pueden purificar y analizar, estudiar sus propiedades y seguir su transformación a través del metabolismo. Muchas veces se llega incluso a sintetizarlas. El número y la variedad de estas moléculas aumentan constantemente, al igual que el de las reacciones por las cuales se transforman en el organismo. En el laboratorio y a la temperatura del cuerpo, estas reacciones proceden con una lentitud extrema. No obstante, para cada reacción se encuentra una actividad catalítica particular, una diastasa, una «enzima» como se la llamará después, que aumenta varios millares de veces la velocidad de reacción. Se analizan las cinéticas y se describen sus características. Poco a poco, para cada una de las reacciones que se identifican se descubre la actividad enzimática correspondiente. Cada enzima se designa por el nombre de su sustrato añadiéndole el sufijo *asa*. Hay enzimas para la degradación de todas las clases de compuestos, sucrasas, lipasas, protea-

sas. En una clase como la de las sucrasas, existen enzimas particulares para cada tipo de azúcar: una amilasa, una lactasa y una sacarosa. También existen enzimas como la maltasa, capaces no sólo de degradar un azúcar sino, en ciertas condiciones, de resintetizarlo a partir de los productos de su degradación. Hay incluso enzimas encargadas de los procesos de respiración. Desde Lavoisier se sabía que la respiración es una combustión, aunque de un tipo particular, ya que se efectúa lentamente y a baja temperatura, pero a principios del siglo XX la respiración se convierte en el resultado de actividades enzimáticas especializadas que catalizan la oxidación lenta de los alimentos en pasos sucesivos. Primero los alimentos se digieren, y luego los productos de la digestión se oxidan por la extracción de átomos de hidrógeno. Oxidaciones y reducciones se acoplan gracias a unas moléculas pequeñas capaces de oxidarse o reducirse alternativamente a gran velocidad. La respiración se transforma entonces en un juego de reacciones de óxido-reducción, cada una catalizada por una enzima. De esta forma se transfieren electrones a lo largo de una cadena que comienza en los metabolitos y acaba en el oxígeno molecular. En las fermentaciones que tienen lugar en ausencia de oxígeno, éste es reemplazado por ciertos compuestos orgánicos. Pero siempre se encuentra una enzima particular para activar la correspondiente reacción. En esto consiste la especificidad de los efectos catalíticos en la química de lo viviente, que puede describirse con el aforismo: una reacción, una enzima. En consecuencia, una vez precisada su acción, las enzimas proporcionan a la química una nueva arma tanto para el análisis como para la síntesis. Con ayuda de las enzimas que él mismo caracteriza, el bioquímico es capaz de manipular a su antojo las moléculas celulares pequeñas, de cortarlas o agrandarlas con precisión, de reducir un átomo aquí o añadir un radical allá. El bioquímico adquiere de este modo una seguridad y un virtuosismo hasta entonces inimaginables.

Pertrechada de materiales y métodos nuevos, la bioquímica elabora toda una serie de conceptos propios. En primer lugar, la identificación de compuestos y reacciones cada vez más numerosos lleva al concepto de «metabolismo intermediario». Por ello se entiende el conjunto de reacciones por las cuales los alimentos se transforman en compuestos específicos. Era evidente desde antiguo que un alimento no contiene todos los cuerpos que constituyen un organismo o una célula. Así pues, era necesa-

rio que estos alimentos fueran descompuestos y luego, con los productos resultantes, se ensamblaran los compuestos específicos. Es lo que ilustran todas las observaciones hechas sobre el crecimiento de los microorganismos desde Pasteur: la levadura, por ejemplo, es capaz de multiplicarse en medios perfectamente definidos que contienen sales minerales y un sólo compuesto orgánico, glucosa u otro azúcar, como fuente de carbono y de energía. Una vez ha penetrado en la célula, es preciso que la glucosa se transforme para dar nacimiento a todos los compuestos indispensables para el crecimiento y la vida de la levadura. Estas transformaciones no se efectúan de golpe, sino que se descomponen en una serie de etapas, cada una de ellas simple y accesible al análisis. Corresponden, por tanto, a cadenas de reacciones que ponen en juego a toda una serie de intermediarios que casi nunca juegan un papel fisiológico particular, sino que representan cada uno de ellos el producto de una reacción y el sustrato de la siguiente. Los alimentos son tratados primeramente por enzimas específicas que los descomponen, los fragmentan y los transforman en moléculas pequeñas. Estas sirven luego de sustrato a otras enzimas que las remodelan, añaden átomos, sustituyen radicales, las alargan y sueldan; en otras palabras, fabrican los constituyentes propios del organismo. En esta suerte de factoría química, las cadenas de descomposición producen un enjambre de moléculas pequeñas que es transformado en compuestos específicos por las cadenas de síntesis. Muchas veces se encuentran las mismas cadenas metabólicas en organismos diferentes. La degradación de la glucosa, por ejemplo, durante la fermentación de la levadura o durante la contracción de un músculo en ausencia de oxígeno se realiza a través de las mismas reacciones e intermediarios. Se perfila así la unidad de la química del mundo vivo.

Para la bioquímica, los alimentos deben abastecer al organismo no sólo de materiales de construcción, sino también de energía. Cuando una levadura utiliza un azúcar para crecer, en presencia o en ausencia de aire, por respiración o por fermentación, sólo una parte del azúcar consumido pasa a formar parte de la levadura. El resto proporciona la energía necesaria para su trabajo. Para crecer y multiplicarse, y para mantener su orden a contracorriente de la degradación del universo, los organismos deben recibir energía del exterior. La energía consumida por la mayoría de los seres vivos procede, en última instancia, del Sol. Sin embargo, los

distintos tipos de organismos se procuran la energía de varias maneras. Algunos, como las plantas, obtienen directamente su energía de la luz solar por medio de la fotosíntesis; otros, como ciertas bacterias, la obtienen de la oxidación de compuestos minerales, y otros, como la mayoría de animales, la obtienen de la oxidación de compuestos orgánicos. En cualquier caso, y para que esté disponible en el momento oportuno, la energía se almacena en forma química. Para los bioquímicos, la energía se acumula en ciertos compuestos fosforados con enlaces de «alto potencial energético». A través de la formación, la rotura o la transferencia de estos enlaces se acumula, se libera o se intercambia la energía que contienen. Finalmente, un mismo compuesto, común al conjunto del mundo vivo, hace de acumulador de energía en todos los organismos conocidos. Se trate de bacterias o de mamíferos, de respiración o de fermentación, la degradación de un azúcar se efectúa siempre a través de una serie de operaciones parecidas: las mismas etapas y reacciones que desembocan en la producción del mismo compuesto de alto potencial energético. La noción de una unidad de funcionamiento para el conjunto de los seres vivos adquiere cada vez más fuerza.

Ahora se puede analizar más a fondo la nutrición de los organismos, precisar sus exigencias alimentarias y averiguar lo que es indispensable para su crecimiento y su reproducción. Ciertos compuestos, llamados «vitaminas», resultan ser necesarios para la salud y la vida de los mamíferos. Otros, llamados «factores de crecimiento», son necesarios para la multiplicación de ciertos microbios. Al precisar la naturaleza de los compuestos requeridos por organismos tan diferentes como las bacterias y los mamíferos, fisiólogos y bioquímicos encuentran analogías singulares: los factores necesarios para las bacterias se identifican a menudo con las vitaminas indispensables para los mamíferos. Además, estos compuestos no se encuentran solamente en los organismos que los obtienen de su alimento, sino en todos los seres vivos. Ciertos organismos son capaces de sintetizar por sí solos estos compuestos, mientras que otros no pueden hacerlo. Estos últimos necesitan incorporar los compuestos que no pueden elaborar. De ahí la noción de «metabolitos esenciales» para la vida de los organismos. La unidad del mundo viviente no se perfila sólo en el funcionamiento de los organismos, sino también en su composición.

Así pues, en la primera mitad de este siglo la experimentación ha encontrado una vía de acceso a la química de lo viviente. Las reacciones se estudian por centenares en los tubos de ensayo. Se analiza un número considerable de compuestos relativamente simples. Se trazan las transformaciones por las cuales se constituyen las reservas de energía y se elaboran los materiales de construcción. Cuanto más se precisan estas reacciones, menos se distinguen de la química de laboratorio. La originalidad de la química de los seres vivos reside sobre todo en las enzimas. Gracias a la especificidad de la catálisis enzimática, a su precisión y eficacia, se ha podido tejer la red de todas las operaciones químicas en el espacio minúsculo de la célula. Esta misma selectividad, que permite a cada enzima escoger uno solo de los isómeros ópticos de un mismo compuesto, imprime una disimetría en la química de lo viviente. Se persigue caracterizar las enzimas y determinar su naturaleza y su modo de acción. Poco a poco, los bioquímicos empiezan a asociar las actividades enzimáticas a la presencia de proteínas. Cada propiedad enzimática particular se convierte en atributo de una proteína particular. El secreto de la química de los seres vivos hay que buscarlo en la naturaleza y las cualidades de las proteínas. Sin embargo, los métodos de la bioquímica que convienen al análisis de moléculas relativamente simples no parecen ser aptos para el análisis de estas enormes arquitecturas moleculares. Frágiles e inestables, las proteínas se desnaturalizan fácilmente. Difíciles de manejar, escapan a los medios clásicos de estudio. Descomponiéndolas de varias maneras se observa que están formadas por unidades moleculares simples, los «aminoácidos», enlazados por centenares en cada molécula de proteína. Poco a poco se ponen a punto métodos nuevos para prepararlas, aislarlas y purificarlas. Se llega incluso a cristalizar ciertas proteínas-enzimas, como si fueran sales metálicas. Otro obstáculo que desaparece entre las dos químicas. No obstante, las proteínas continúan siendo excepcionalmente complejas. La bioquímica no encuentra todavía la manera de acceder a la estructura de estas moléculas ni a la disposición de los aminoácidos que determina el poder de fijar específicamente un metabolito con exclusión de cualquier otro y de catalizar su transformación. El análisis de las proteínas exige técnicas y conceptos nuevos. Estos no estarán disponibles hasta mediados de este siglo, bajo la influencia con-

jugada de la física, la química de los polímeros y la teoría de la información.

A principios del siglo XX las dos nuevas ciencias, la genética y la bioquímica, imprimen un giro nuevo a la biología. En primer lugar, porque ambas introducen el rigor hasta entonces desconocido de los métodos cuantitativos: no basta ya con constatar la existencia de un fenómeno; en adelante es preciso valorar los parámetros, medir las velocidades de las reacciones o las frecuencias de recombinación, determinar una constante de equilibrio o una tasa de mutación. En segundo lugar, porque ambas desplazan el centro de actividad en los seres vivos. Estos ya no se escalonan en profundidad por la sola disposición de órganos y funciones; ya no se enroscan alrededor de un centro vital de donde surge la organización. Para la bioquímica, la actividad del organismo se dispersa en el ámbito de cada célula, en los miles de gotitas coloidales donde se efectúan las reacciones químicas y se construyen las arquitecturas. Para la genética, dicha actividad se concentra en el núcleo celular, en el movimiento de los cromosomas, donde se deciden las formas, se determinan las funciones y se perpetúa la especie. Cada ciencia se refiere a su propio modelo. Los químicos hablan de estructuras moleculares y de catálisis enzimática; explican cómo los organismos obtienen energía del medio y remontan de este modo el curso natural de las cosas; ya no hay sólo un flujo de materia que atraviesa el organismo, sino también un flujo de energía. Los genéticos describen la anatomía y la fisiología de una estructura de tercer orden, situada en los cromosomas; atribuyen a su fijeza la memoria de la especie, y a sus cambios la aparición de especies nuevas. Las cualidades de los seres vivos descansan finalmente sobre dos entidades nuevas: lo que los bioquímicos llaman proteína y lo que los genéticos denominan gen. La primera es la unidad de actuación química, que ejecuta las reacciones y da a los cuerpos vivos su estructura. La segunda es la unidad de herencia, que rige a la vez la reproducción de una función y su variación. El gen gobierna, la proteína ejecuta.

A mediados de siglo las dos ciencias se encuentran prácticamente en el mismo punto. Cada una de ellas ha logrado descubrir el elemento unitario que está en el centro de su campo de investigación. Cada una de ellas conoce, por lo tanto, el objeto de los análisis venideros. Pero ambas se encuentran desprovistas de los medios necesarios para emprenderlos.

De hecho, antes de la última guerra la biología se convirtió en una ciencia compartimentada. Cada especialista se consagra al estudio de sus problemas con su propio material. En el mismo instituto, a veces incluso en la misma planta, cohabitan a menudo dos colegas que se interesan uno por los genes y el otro por las moléculas. Las conclusiones de la genética exigen la presencia en los cromosomas de una sustancia con dotes poco comunes: por un lado, debe determinar las estructuras y funciones de los cuerpos vivientes; por otro, debe producir copias rigurosamente idénticas de sí misma sin excluir la posibilidad de variaciones ocasionales. La química encuentra en los núcleos celulares dos clases de sustancias: las proteínas y el ácido aislado por Miescher en el siglo pasado y que denominó «nucleico». Pero la estructura de este último todavía se conoce mal. Se sabe que está compuesto por cuatro moléculas particulares, dos «bases púricas» y dos «bases pirimidínicas», unidas cada una de ellas a un azúcar y un grupo fosfato en un «nucleótido». Los cuatro compuestos se asocian en la forma de un «tetranucleótido». Así, el ácido nucleico aparece como una especie molecular sin variedad ni fantasía, y por lo tanto sin ninguna aptitud para ejercer papel alguno en la herencia. Este papel se adjudica a las proteínas, aunque sus propiedades se prestan poco al mismo. Por su complejidad, la herencia parece situarse fuera del alcance de la química experimental.

«Cuantos más descubrimientos se hacen sobre la herencia», dice J. B. S. Haldane, «más difícil resulta imaginar en términos físicos o químicos una descripción o una explicación capaz de englobar todos los hechos de una coordinación persistente»[361]. A finales del siglo XIX y principios del XX desapareció el viejo vitalismo al que tuvo que recurrir al principio la biología para adquirir su independencia. Ante el desarrollo de la ciencia experimental, de la genética y la bioquímica, ya no se puede, razones místicas aparte, invocar seriamente ningún principio de origen desconocido, un *x* cuya esencia escapa a las leyes de la física, para explicar los seres vivos y sus propiedades. Si la física no está en condiciones de explicar el conjunto de los fenómenos vitales, ello no se debe a la existencia de una fuerza reservada al mundo vivo y situada más allá de todo conocimiento, sino a las limitaciones inherentes a la observación y el

[361] *The Philosophical Basis of Biology*, Londres, 1931, pág. 12.

análisis, y a la complejidad propia de los seres vivos. Así como ciertas características de los átomos no pueden ya reducirse a la mecánica, podría ser que ciertas particularidades de la célula no puedan interpretarse en los términos de la física atómica. Para Niels Bohr, «constatar la importancia de las propiedades de los átomos en las funciones de los seres vivos no basta para explicar los fenómenos biológicos. El problema consiste, pues, en saber si todavía falta algún dato fundamental para analizar los fenómenos naturales antes de comprender la vida sobre la base de la experiencia de la física… En este caso la existencia de la vida debería considerarse como un hecho elemental sin explicación posible, como un punto de partida para la biología, del mismo modo que el cuanto de acción, que aparece como un elemento irracional para la mecánica clásica, constituye con las partículas elementales el fundamento de la física atómica»[362]. Lo que podría entonces imponer un límite al conocimiento del mundo vivo no es ya una diferencia de naturaleza entre lo viviente y lo inanimado. Es la insuficiencia de nuestros medios o, dicho de otro modo, de nuestras posibilidades de análisis. A esto hay que añadir en los constituyentes de los seres vivos una complejidad sin comparación posible con la de las moléculas estudiadas por la física y la química clásicas. Podría darse el hecho de que los seres vivos, lejos de escapar a las leyes de la física, pusieran en juego, como dice Schrödinger, «otras leyes de la física, todavía desconocidas, pero que, una vez descubiertas, formarán parte integrante de esta ciencia»[363]. Ya no es necesario, por lo tanto, recurrir a una fuerza misteriosa para justificar el origen, las propiedades y el comportamiento de los seres vivos. Se trata de saber si las leyes descubiertas en el análisis de la materia son suficientes o si hay que seguir buscando. Para constituirse en ciencia, la biología tuvo que separarse radicalmente de la física y de la química. A mediados del siglo XX, para llevar a cabo el análisis de la estructura de los seres vivos y de su funcionamiento, necesita asociarse estrechamente con ellas. De esta unión nacerá la biología molecular.

---

[362] *Light and life*, en *Nature*, vol. 131, 1933, pág. 458.

[363] *What is life*?, ed. 1956, pág. 67.

# 5. La molécula

A mediados del presente siglo la organización cambia de estatuto una vez más. En adelante es la estructura de los elementos constituyentes la que determina la estructura del conjunto y su integración. En los seres vivos, la organización gana en profundidad y se sitúa en los detalles más finos de la célula. Hasta entonces, y a pesar de la presencia de un núcleo y de diversos orgánulos, la célula se presentaba como una especie de «saco de moléculas». Si en el interior de la célula podían entrelazarse innumerables reacciones químicas y procesos catalíticos, esto se debía sobre todo a la naturaleza del protoplasma, a esa red mal definida que se describía como sustancia coloidal. Para coordinar las actividades de los órganos y los tejidos, los organismos complejos disponían de un mecanismo particular. Los nervios y las hormonas tejían una red de interacciones que ligaban los elementos más alejados del cuerpo. La unidad de la organización descansaba sobre mecanismos especializados en la regulación de las funciones. No había nada comparable en las estructuras más simples.

Con el desarrollo de la electrónica y la aparición de la cibernética, la organización se convierte, por derecho propio, en objeto de estudio de la física y la tecnología. Las exigencias de la guerra y de la industria conducen a la construcción de instrumentos automáticos cuya complejidad se acrecienta por integraciones sucesivas. En un televisor, un misil antiaéreo o una computadora se integran elementos que ya son sistemas integrados a un nivel inferior. Cada uno de estos objetos constituye un sistema de sistemas. En cada uno de ellos, lo que sostiene la organización del conjunto es la interacción de los constituyentes. Solamente hay integración en la medida en que los elementos se comunican entre sí y sus actividades particulares se modulan recíprocamente en función del objetivo que persigue el conjunto. Hasta entonces, la coordinación de los constituyentes era una propiedad reservada solamente a ciertos sistemas. En adelante, la organización y la interacción de los elementos ya no pueden disociarse. Cada una de ellas constituye para la otra su condición de existencia, su causa y su efecto a un mismo tiempo. Solamente hay inter-

acción cuando los constituyentes reaccionan entre sí. Solamente hay influencia recíproca entre los constituyentes en la medida en que el sistema está integrado. Si existe la posibilidad de establecer intercambios entre los elementos de un cuerpo organizado, es porque su estructura lo permite. Pero, al mismo tiempo, la organización de estos elementos contiene en potencia la serie de sus adecuaciones en el tiempo, es decir, la de sus propias transformaciones. A fin de cuentas, la coordinación de las actividades determina tanto la evolución de un sistema integrado como sus propiedades. La lógica interna de un sistema de este tipo nace de la relación entre estructura y función.

Las cualidades de un ser vivo, su actividad, su desarrollo, se limitan entonces a traducir las interacciones que se establecen entre sus constituyentes. En el origen de cada carácter se encuentran las propiedades de ciertas arquitecturas. El análisis de la función no puede disociarse del de la estructura. Estructura celular para el funcionamiento del cuerpo y estructura molecular para el de las células. Sin embargo, interpretar el proceso que se desarrolla en los seres vivos por la estructura de las moléculas celulares características exige una convergencia analítica y una combinación de métodos. A lo largo de cien años, la biología experimental se había ido escindiendo en una serie de ramas que tendían a aislarse cada vez más. Cada disciplina se centraba en un pequeño número de técnicas que fijaban los límites de su dominio. A mediados de este siglo, por el contrario, estas disciplinas separadas se ven en la obligación de reasociarse. Para proseguir con sus análisis tienen que unificar esfuerzos, articular enfoques, adaptar métodos, en pocas palabras, constituirse en una «biología molecular». Para trabajar en biología molecular ya no basta con aplicar una técnica, analizar un fenómeno y medir todos los parámetros. Es necesario recurrir al conjunto de medios necesarios para precisar la arquitectura de los compuestos en cuestión y la naturaleza de sus relaciones. Ya no se busca, por ejemplo, estudiar los genes por una parte, las reacciones químicas por otra y los efectos fisiológicos por una tercera. Ahora se trata de describir la cadena de eventos que conduce del gen al carácter en términos de especies moleculares, de síntesis y de interacciones. La memoria de la herencia está concentrada en la organización de una macromolécula, en el «mensaje» constituido por la secuencia de símbolos químicos a lo largo de un polímero. Esta macromo-

lécula se convierte en la estructura de cuarto orden que determina la forma de un ser vivo, sus propiedades y su funcionamiento.

Física y bioquímica, genética y fisiología, se confunden ahora en una nueva práctica. Lo anterior equivale a afirmar que la biología molecular no puede ser competencia exclusiva de individuos aislados, preocupados cada uno de ellos por su problema y por su organismo. La biología molecular exige un esfuerzo conjugado de hombres y técnicas. En un mismo instituto, en un mismo laboratorio, colaboran especialistas separados por su formación, pero unidos por un mismo objeto de análisis y un mismo material. En adelante ya no existen dos tipos de biología, la que se interesa por el organismo completo y la que se interesa por sus constituyentes. Se continúa mirando la «caja negra» desde fuera para observar sus propiedades, pero al mismo tiempo se la abre para ver los engranajes, desmontarlos y tratar de reconstruir el mecanismo a partir de las piezas sueltas. Organismo y constituyentes sólo pueden interpretarse uno en relación a los otros. Anteriormente obligada a aislarse para definir sus métodos y sus objetivos, la biología se ve ahora estrechamente asociada con la física y la química, sin perder por ello nada de su carácter propio.

## Las macromoléculas

A mediados del siglo XIX la noción de energía y de equivalencia habían modificado la representación del mundo vivo al establecer, por una parte, un nexo entre la química de los seres y la de las cosas y, por otra, un fundamento común a las actividades más variadas de un organismo. La energía había sustituido así a la fuerza vital, pero esto no era aplicable a todas las funciones. En un organismo complejo las células se cuentan por billones. Las moléculas de una célula se cuentan a su vez por millones. Pero nada explicaba la especificidad de las arquitecturas, ni la disposición de las células, ni el lugar ocupado por los átomos en los isómeros, esas sustancias de composición idéntica pero de propiedades diferentes. Por un lado, la mecánica estadística permitía interpretar el comportamiento medio de las grandes poblaciones moleculares. Por el otro, los análisis de la genética demostraban que los caracteres de los seres vivos no proceden de fenómenos estadísticos, que no son resultado de fluctuaciones aleatorias de un número enorme de moléculas, sino que, por el

contrario, se basan en la cualidad de ciertas sustancias contenidas en los cromosomas. En contra de lo que ocurre en los cuerpos inanimados, el orden de los seres vivos no puede derivarse del desorden, sino que se funda en la reproducción de un orden ya constituido. «La vida», dice Schrödinger, «parece ser un comportamiento de la materia regido por leyes y basado no en la tendencia a pasar del orden al desorden, sino en la conservación de un orden preexistente»[364].

El concepto de información abre una vía de acceso al análisis de este orden y de su transmisión. Al ignorar los parámetros relativos a cada individuo y referirse solamente al comportamiento medio de una población, la termodinámica estadística renuncia al conocimiento de la estructura interna del sistema. Se podría decir que sólo percibe la superficie. Sin embargo, bajo una misma superficie pueden ocultarse organizaciones muy distintas. La información que proporciona el análisis estadístico del sistema es tanto más incompleta cuanto mayor es el número de estructuras internas que pueden traducirse en un mismo comportamiento medio. Para Maxwell, la adquisición de esta información era gratuita. Sólo la insuficiencia de su equipo sensorial impedía al hombre obtenerla; pero al demonio hipotético dentro de un recipiente de gas no le costaba nada evaluar la calidad de las moléculas y seleccionarlas. Para Szilard y Brillouin, por el contrario, la información tiene un precio. El demonio solamente puede «ver» las moléculas si interacciona con ellas a través de algún proceso físico, como la radiación. Lo que tiende al equilibrio no es el gas solo, sino el conjunto del gas más el demonio. Tarde o temprano, este último quedaría «ciego» en medio de su gas, y para distinguir las partículas necesitaría una energía extra procedente del exterior del sistema en forma de luz, por ejemplo. De esta forma el demonio adquiriría la información deseada sobre las moléculas y, seleccionándolas, podría rebajar la entropía del sistema. Sin embargo, al final del proceso la entropía general habría aumentado. El demonio tampoco puede escapar a la omnipotencia del segundo principio de la termodinámica. El sistema funciona gracias a una serie de transformaciones sucesivas en las que interviene la información. Entropía e información son como la cara y la cruz de una moneda. En un sistema dado, la entropía es una medida del

364 *What is 1ife*?, pág. 68.

desorden y, al mismo tiempo, de nuestro grado de ignorancia sobre la estructura interna; la información es una medida del orden y de nuestro conocimiento. Ambas se evalúan del mismo modo. Una es el negativo de la otra.

Este isomorfismo entre la entropía y la información establece un vínculo entre las dos formas del poder: el de hacer y el de dirigir lo que se hace. En un sistema organizado, vivo o no vivo, los intercambios tanto de materia y energía como de información unen los elementos. La información, entidad abstracta, se convierte en el lugar donde se articulan los diferentes tipos de orden. Ella es al mismo tiempo lo que se mide, lo que se transmite y lo que se transforma. Toda interacción entre los miembros de una organización puede contemplarse como un problema de comunicación. Esto se aplica tanto a la sociedad humana como a un organismo vivo o un aparato automático. En cada uno de estos sistemas la cibernética encuentra algún modelo aplicable a los otros. En la sociedad humana, el lenguaje es el representante por excelencia de un sistema de interacción entre elementos de un conjunto integrado. En el organismo, la homeostasis es el mejor ejemplo de fenómeno que se opone a la corriente general hacia el desorden. En el aparato automático, su funcionamiento exige la integración de combinaciones de circuitos. En última instancia, todo sistema organizado puede analizarse sobre la base de dos conceptos: el de mensaje y el de regulación por retroacción.

Por mensaje se entiende una sucesión de símbolos tomados de un cierto repertorio. Estos símbolos pueden ser signos, letras, sonidos, fonemas, etc. Así pues, un mensaje dado constituye una selección particular dentro de un conjunto de ordenaciones posibles, un cierto orden entre todos los que autoriza la combinatoria de los símbolos. La cantidad de información mide la libertad de esta elección, es decir, la improbabilidad del mensaje, pero ignora su contenido semántico. Cualquier estructura material puede entonces compararse a un mensaje, en el sentido de que la naturaleza y la posición de los elementos que la componen, átomos o moléculas, son producto de una selección entre una serie de posibilidades. Por transformación isomorfa, según un código, dicha estructura puede traducirse en otro juego de símbolos, y en esta forma ser comunicada por un emisor desde cualquier punto del globo hasta un receptor que la reconstruya por transformación inversa. Así funcionan la radio, la

televisión y los servicios secretos. No existe nada, dice Wiener[365], que nos impida «considerar el organismo como un mensaje».

En cuanto a la retroacción, es un principio de regulación que permite a una máquina ajustar su actividad en función no de lo que debe hacer, sino de lo que realmente hace. Opera introduciendo en el sistema los resultados de su actividad pasada, para lo cual pone en juego órganos sensoriales encargados de valorar la actividad de los órganos motores, de verificar sus prestaciones y de corregirlas. Esta vigilancia tiene por objeto compensar la tendencia del mecanismo a la desorganización, es decir, producir una inversión temporal y local del incremento de entropía. Según su complejidad, estos mecanismos van desde el simple termostato de un horno hasta la constitución de un verdadero sistema de aprendizaje. Toda organización hace intervenir bucles retroactivos mediante los cuales cada elemento se informa de los efectos de su propio funcionamiento para ajustarlo en consecuencia en interés del conjunto.

Ante la posibilidad de realizar mecánicamente una serie de operaciones previstas en un programa, el viejo problema de la relación entre la máquina y el animal se plantea en términos nuevos. «Los dos sistemas», dice Wiener, «tienen en común que ambos se esfuerzan en mantener su entropía por medio de la retroacción»[366]. Esto lo consiguen desorganizando el medio exterior, «consumiendo entropía negativa», según la expresión de Schrödinger y de Brillouin. En efecto, ambos poseen una maquinaria especializada en recoger, en condiciones de baja energía, información procedente del mundo exterior y transformarla con vistas a su propio funcionamiento. En ambos casos es la realización, y no la intención, la que ajusta la acción del sistema sobre el mundo exterior mediante un centro regulador. Un organismo sólo conserva cierta estabilidad a través de préstamos constantes del exterior. De esta forma consigue oscilar alrededor del punto de equilibrio que lo caracteriza pese a las fluctuaciones del medio. Si logra mantener su homeostasis es por los innumerables mecanismos de regulación que le permiten definir las condiciones más favorables para su propia existencia. Todo sistema, vivo o no, que funciona tiende a consumirse, a degradarse y a ganar entropía.

---

[365] *The Human Use of Human Beings,* 1954, pág. 95.

[366] *Ibid*., pág. 26.

Gracias a la regulación, cada degradación local es compensada por un trabajo producido en otra parte del organismo. De lo cual resulta otro incremento de entropía, compensado a su vez por otro trabajo efectuado en otra parte del cuerpo; y así sucesivamente, en una especie de cascada en la que cada pérdida de orden en un sitio es compensada por una ganancia en otro. La coordinación del sistema se basa en una red de circuitos reguladores responsables de la integración del organismo. Pero, como en un salto de agua, el cambio total de energía que resume el conjunto de operaciones se efectúa siempre en la misma dirección: la impuesta por el segundo principio de la termodinámica. La tendencia estadística hacia el desorden deteriora poco a poco todo sistema cerrado a cualquier intercambio con el exterior. El mantenimiento del estado ordenado de un sistema vivo siempre se salda con un déficit de organización en el entorno, es decir, con el aumento del desorden en el conjunto constituido por el organismo y su medio. Un ser vivo no puede ser un sistema cerrado. No puede dejar de absorber alimento, ni de expulsar desechos, ni de ser atravesado por un flujo ininterrumpido de materia y energía del exterior. Sin una afluencia constante de orden, el organismo se desintegra. El aislamiento significa la muerte. Todo ser vivo está permanentemente conectado de alguna manera a la corriente general que lleva al universo hacia el desorden. Representa una suerte de derivación, a la vez local y transitoria, que mantiene la organización y le permite reproducirse.

Animal y máquina se convierten en sistemas modelos uno del otro. La máquina puede describirse en términos de anatomía y fisiología. Posee órganos ejecutores animados por una fuente de energía. Dispone de toda una serie de órganos sensoriales que responden a estímulos luminosos, sonoros, táctiles y térmicos para velar por su propia salud, explorar el medio y controlar la alimentación. Incluye centros de control automático para evaluar sus prestaciones, más una memoria donde se consignan las acciones que deben llevarse a cabo y se inscriben los datos de la experiencia pasada. Todo ello conectado por un sistema nervioso que, por un lado, lleva al cerebro las impresiones procedentes de los sentidos y, por otro, transmite órdenes a los miembros. En cualquier instante, la máquina que ejecuta un programa es capaz de orientar su acción, de corregirla y hasta de interrumpirla en función de los mensajes recibidos.

Inversamente, el animal puede describirse a la luz de la máquina. Órganos, células y moléculas están conectados mediante una red de comunicación. Se intercambian sin cesar señales y mensajes en la forma de interacciones específicas entre los constituyentes. La flexibilidad de comportamiento se asienta en bucles retroactivos; la rigidez de las estructuras en la ejecución de un programa rigurosamente prescrito. La herencia se convierte en la transmisión de un mensaje que se repite generación tras generación. En el núcleo del huevo está escrito el programa de las estructuras que deben formarse. «La fibra cromosómica», dice Schrödinger, «contiene cifrado en una suerte de código miniatura todo el futuro de un organismo, su desarrollo y su funcionamiento… Las estructuras cromosómicas detentan asimismo los medios para ejecutar este programa. Son al mismo tiempo la ley y el poder ejecutivo, el plano del arquitecto y la técnica del constructor.»[367] Así pues, el orden de un ser vivo se asienta en la estructura de una gran molécula. Por razones de estabilidad, la organización de un cromosoma se asemeja a la de un cristal. Pero no se trata de la típica estructura monótona en la que un mismo patrón químico se repite hasta el infinito con la misma periodicidad en las tres dimensiones, sino de lo que los físicos llaman «cristal aperiódico», en el que la combinación de varios patrones ofrece la variedad exigida por la diversidad de los seres vivos. Unos cuantos patrones bastan, añade Schrödinger. En el alfabeto Morse, la combinación de dos símbolos permite cifrar cualquier texto. El plan del organismo queda trazado por una combinatoria de símbolos químicos. La herencia funciona como la memoria de una computadora.

Hasta mediados del presente siglo, la estructura de las macromoléculas era prácticamente inaccesible. Pero, una vez más, la convergencia de dos líneas de investigación la convertirá en objeto de análisis. Por un lado, la tecnología encuentra en los polímeros una fuente de nuevos materiales para la industria. Por otro, la física y la química se esfuerzan en purificar las macromoléculas, determinar su composición y precisar su organización. La existencia de polímeros en los seres vivos se conocía desde principios del siglo XIX. Los químicos habían constatado a menudo que la hidrólisis de ciertas sustancias de gran peso molecular daba

[367] *What is1ife?*, págs. 18-19.

muy pocos compuestos simples, a veces uno solo. La celulosa o el almidón, por ejemplo, están compuestos por moléculas de glucosa, mientras que el caucho o la gutapercha lo están por moléculas de isopreno. Berzelius introdujo los términos «polímero» para la macroestructura y «monómero» para la unidad básica. Las más de las veces estas unidades parecían formar cadenas. Sin embargo, la similitud de composición no excluía la diversidad de estructura. Pese a que ambas sustancias están constituidas por glucosa, el almidón y la celulosa poseen propiedades muy diferentes: en una u otra forma, el primero forma parte de la alimentación de toda la humanidad, mientras que la segunda es indigerible por el ser humano. Sólo la disposición de las unidades puede justificar tal diferencia. En ciertos polímeros las unidades forman cadenas monótonas; en otros, por el contrario, las unidades se disponen de manera alternada, unas veces en un sentido y otras en el opuesto. Las cadenas pueden ser largas o cortas, lineales o ramificadas. En ciertos polímeros sólo se encuentra una especie de monómero; en otros más de una. En resumen, la variación de unos pocos parámetros basta para generar la diversidad.

A principios de siglo los químicos intentan analizar en el laboratorio los medios empleados por la naturaleza para construir estas macroestructuras. La química de los polímeros difiere de la de los compuestos pequeños y se basa en principios distintos. Para preparar una molécula orgánica pequeña, el químico debe intervenir en cada etapa y colocar cada átomo en la posición deseada, muchas veces a un alto precio. La producción de polímeros, por el contrario, sólo exige mezclar las unidades básicas en ciertas proporciones y colocarlas en condiciones convenientes de acidez, temperatura, presión, etc. Una vez iniciada la reacción, se desarrolla espontáneamente, sin que el químico tenga que intervenir. En todo caso, éste puede influir de distintas maneras en la naturaleza del producto final: variando las condiciones de la reacción, cambiando las unidades básicas, modificando sus proporciones y, sobre todo, añadiendo a la mezcla ciertas sustancias que actúan como catalizadores y guían de alguna manera la orientación de las unidades a lo largo de la cadena. Los catalizadores permiten dirigir la reacción y controlar la organización espacial del producto. Se establece entonces una cooperación estrecha entre el laboratorio y la industria. Con la polimerización de moléculas simples aparece toda una serie de sustancias nuevas, en particular hidro-

carburos, que, junto a todo un conjunto de conceptos y técnicas, va a influir progresivamente en la actitud de la biología ante las macromoléculas de los seres vivos.

La tecnología de los polímeros se une así a los métodos de análisis que la física y la química van refinando. La naturaleza de las macromoléculas confiere a los polímeros en disolución sus propiedades particulares de densidad, carga eléctrica, difracción de la luz y viscosidad. Estas propiedades son la base de tratamientos que permiten estudiar el comportamiento de estos compuestos. Se les puede pesar, por así decirlo, sometiéndolos a fuerzas centrífugas cientos de miles de veces superiores a la gravedad. Se puede medir su agilidad en un campo eléctrico, estimar su tamaño, su volumen y su forma general; en suma, se puede llegar a tener una visión de conjunto de sus arquitecturas moleculares. Pero hay tres técnicas que van a contribuir decisivamente a revelar hasta el mínimo detalle la composición de estas moléculas, su organización interna y los procesos de su síntesis.

La primera procede de la química. A principios de siglo, los botánicos habían purificado y aislado los diversos pigmentos vegetales colocando extractos de plantas en el extremo superior de largas columnas llenas de ciertos polvos calcáreos y vertiendo a continuación un disolvente. Los pigmentos así disueltos se separaban unos de otros al bajar por la columna y quedaban retenidos a alturas diferentes. Este método, conocido como «cromatografía», fue adoptado y diversificado por los químicos. La técnica se presta a infinitas variaciones. Se puede variar la composición de la columna, la del líquido disolvente, la actividad, la concentración iónica, etc. La cromatografía tiene un gran poder de resolución, pues permite discernir entre compuestos muy similares, con diferencias mínimas de carga eléctrica, tamaño o forma. Se puede utilizar, a guisa de columna, una hoja de un papel especial sobre la que se vierten poco a poco, primero en una dirección y luego en otra perpendicular, las disoluciones de los productos que se quiere analizar. Cada compuesto se desplaza a una velocidad propia. Para el químico resulta casi un juego discriminar cualitativa y cuantitativamente entre compuestos casi idénticos. No es exagerado decir que la simplicidad y la eficacia de esta técnica transformaron por completo el análisis de las macromoléculas biológicas, especialmente las proteínas y los ácidos nucleicos. Se sabía que estos

compuestos estaban constituidos por un número reducido de radicales químicos, veinte para las proteínas y cuatro para los ácidos nucleicos, que formaban cadenas enormemente largas. Con mucho trabajo se podía incluso hidrolizar la molécula, precisar la naturaleza de las unidades y contar los números de cada una. Sin embargo, no se disponía de ningún medio para analizar la disposición de estas unidades y la organización especial de una proteína. Es la cromatografía la que hace posible tal estudio. Empleando ciertas enzimas, el químico puede practicar cortes en la molécula de proteína y recoger, no las unidades separadas, sino fragmentos que luego puede dividir en fragmentos aún más pequeños para analizar la composición de cada uno. Una vez conocidas las piezas, se trata de recomponer el rompecabezas. Como las distintas enzimas rompen la molécula en puntos específicos, se puede recortar el mismo dibujo en una serie de rompecabezas diferentes. Procediendo paso a paso, al final se obtienen ecuaciones suficientes para resolver todas las incógnitas. Ante el asombro general, una molécula de proteína, a pesar de la extraña complejidad de su arquitectura tridimensional, tiene una estructura primaria de lo más simple. Se trata, en efecto, de un polímero lineal con una longitud de unos cuantos centenares de unidades básicas, de un surtido de veinte. La complejidad espacial nace de los repliegues de la cadena sobre sí misma; la forma particular de la molécula depende de la longitud de la cadena, de cien a mil unidades, y de la secuencia de dichas unidades. Una vez más la diversidad y la complejidad nacen de la simplicidad de una combinatoria.

La segunda técnica que transforma las posibilidades del análisis bioquímico se deriva del descubrimiento de los radioisótopos por los físicos. Un elemento radiactivo emite radiaciones que se pueden captar. Esto quiere decir que es «visible» sea cual fuere su localización en el organismo. El químico puede emplazar un átomo radiactivo en un punto escogido de una molécula sintética, mineral u orgánica. Una vez introducida la molécula en el organismo, puede seguirse su trayectoria. Se pueden observar sus transformaciones sucesivas, su distribución dentro del organismo y su retención o excreción. La utilización de isótopos permite además desenredar los hilos de la maraña del metabolismo intermediario, seguir paso a paso las etapas que presiden la elaboración de las moléculas pequeñas y su polimerización para formar las grandes, y medir la

estabilidad de los constituyentes o su velocidad de renovación. Acoplada al examen histológico, la autorradiografía isotópica aporta también una técnica de marcado de las estructuras celulares que permite registrar sus modificaciones durante el ciclo de la división celular. El objeto de análisis ya no es solamente la composición de los seres vivos, sino la dinámica entera de sus transformaciones químicas.

Finalmente, la tercera vía de acceso a la estructura de las macromoléculas tiene que ver con el perfeccionamiento de los medios de observación por los físicos. La introducción del microscopio electrónico, en el que la sustitución de la luz visible por un haz de electrones multiplica por mil el poder resolutivo del ojo humano, permite observar en detalle los orgánulos celulares y hasta discernir el contorno de ciertas moléculas muy grandes. El análisis de los cristales por difracción de rayos X permite distinguir no ya la forma general de una molécula, sino la posición exacta de cada átomo, y no sólo en los compuestos más simples, sino en las estructuras más elaboradas. Sin embargo, la precisión de los resultados corre pareja con la dificultad de la técnica. El hecho de estar reservada a los físicos hace que algunos de ellos se interesen por la biología en sí. La difracción de los rayos X se empleó en Gran Bretaña a principios de siglo para analizar la organización de cristales simples como los de cloruro de sodio. De ahí nació una escuela de cristalógrafos interesados en resolver la estructura interna de los compuestos más variados, incluidas las macromoléculas biológicas, puesto que estos físicos estaban convencidos de que las funciones de la célula viva sólo podían asentarse en la configuración de dichas moléculas. Fue un físico quien propuso la expresión «biología molecular» para designar este tipo de análisis; después de lo cual, todos los especialistas que se habían dedicado a la experimentación celular se encontraron en la situación del señor Jourdain, quien había estado haciendo biología molecular sin saberlo. Un tanto aislados al principio, los cristalógrafos titubean ante la complejidad de los sistemas biológicos. Deben proceder por etapas, de lo simple a lo complejo; aumentar progresivamente el poder de resolución; aprender a reconocer ciertos sectores privilegiados de las moléculas; marcarlas con átomos pesados fáciles de reconocer en las imágenes de rayos X. Poco a poco, los físicos logran no sólo discernir el contorno de las macromoléculas, sino precisar sus detalles. El análisis puramente cristalográfico

deja paso a un juego sutil en el que se mezclan la interpretación de los datos físicos, la construcción de modelos de laboratorio y la intuición química fundada en el conocimiento de las propiedades de los átomos y de sus enlaces. Por laborioso que sea este diálogo naciente entre la cristalografía y la química teórica, se afirma como el único medio de acceder a la organización de las grandes arquitecturas biológicas. Si bien el análisis químico describe el orden de las unidades a la largo de la cadena, guarda silencio sobre sus repliegues, sobre la anatomía fina de la molécula, sobre su configuración espacial. El análisis físico permite precisar cada detalle de un edificio que contiene varios miles de átomos.

Otro contingente de físicos interesados por la biología, aunque por otras razones, viene a sumarse a los cristalógrafos. Después de la guerra, muchos jóvenes físicos se rebelaron ante la utilización militar de la energía atómica. Además, algunos se cansaron del giro de la experimentación en el campo de la física nuclear, de su lentitud y de la complejidad que impone el empleo de grandes máquinas; veían en ello el final de una ciencia y buscaron otras actividades. Algunos de ellos volvieron la vista hacia la biología con una mezcla de inquietud y esperanza. Inquietud porque, en general, de los seres vivos sólo tenían las vagas nociones de zoología y botánica que recordaban de la escuela. Esperanza porque para sus predecesores más famosos la biología estaba llena de promesas. Niels Bohr ve en ella la fuente de nuevas leyes físicas aún por descubrir. Schrödinger profetiza también para la biología tiempos de renovación y de exaltación, sobre todo en el campo de la herencia. Oír a uno de los padres de la mecánica cuántica preguntarse qué es la vida y describir la herencia en términos de estructura molecular, de enlaces interatómicos y de estabilidad termodinámica bastó para dirigir el entusiasmo de algunos físicos jóvenes hacia la biología y para conferirle una suerte de legalidad. La ambición y el interés de estos investigadores se centran en un solo problema: la naturaleza física de la información genética.

## Los microorganismos

A la transformación de los conceptos y las técnicas hay que añadir un cambio del material empleado para el estudio de la célula y de la herencia. La genética clásica no pudo llenar el vacío existente entre el gen y el carácter. Llegó a la conclusión de que en los cromosomas existía una sustancia capaz a la vez de reproducirse exactamente y de portar la especificidad genética. Pero el material empleado por la genética durante la primera mitad del siglo no se prestaba ni a la investigación de tal sustancia ni al estudio de su modo de acción. Algunos estudios que combinaban fisiología y genética en la Drosophila pusieron en evidencia la influencia de los genes sobre ciertas reacciones químicas del organismo. Sin embargo, en un ser complejo que se reproduce por vía sexual, el efecto de un gen se manifiesta casi siempre sólo al cabo de un largo periodo, después de una serie de transformaciones impuestas por el desarrollo y la morfogénesis. Los organismos estudiados por los genéticos no convenían a los bioquímicos, y viceversa. Para asociar sus esfuerzos les faltaba un material común. Inesperadamente, los microorganismos, en particular las bacterias y los virus, demostrarán ser el material idóneo.

Nacida casi tres siglos antes de la invención del microscopio, la bacteriología se limitó durante mucho tiempo a la observación, hasta que los trabajos de Pasteur la convirtieron en una ciencia experimental. En pocos años, el hombre pudo constatar con sorpresa que sin los microorganismos este mundo no sería lo que es. Sin embargo, la importancia de los microbios como agentes patógenos, su función en los ciclos de los elementos de la superficie de la Tierra, sus usos industriales, todo ello relegó durante mucho tiempo a un segundo plano el valor de los microbios como material para el estudio de los mecanismos biológicos. La teoría celular contribuyó a unificar el mundo viviente, pero las bacterias no fueron incluidas en esta generalización. Su tamaño minúsculo no permitía reconocer ninguna estructura característica en ellas. Lo único que se podía hacer era cultivarlas, describirlas e intentar clasificarlas. A principios de siglo los microbios se convirtieron poco a poco en objetos de estudio para la fisiología y la bioquímica. La evolución de la medicina y la de las industrias exigía un mayor rigor en la identificación de los gérmenes y en el conocimiento de sus propiedades. A medida que aumentaba el número de microbios aislados, se hacía preciso definir sus caracteres para distinguirlos. Aunque los microbiólogos se limitaban a estudiar el crecimiento

en distintas condiciones, poco a poco fueron precisando las necesidades nutritivas de los microorganismos, su poder de utilizar ciertos compuestos como fuente de carbono, y su sensibilidad ante los agentes antimicrobianos. Al mismo tiempo los químicos descubrían en los microorganismos un material particularmente adecuado para sus estudios. Más simple de manejar que un músculo de paloma, más reproducible en sus características que un hígado de rata, un cultivo de levaduras o de bacterias se presta igualmente bien a la extracción de los constituyentes, el análisis del metabolismo y la determinación de las actividades enzimáticas. Palomas, ratas y bacterias resultan ser objetos notablemente semejantes. En todos las mismas reacciones químicas, los mismos intermediarios de alta energía, las mismas actividades enzimáticas siempre asociadas a proteínas. Detrás de la diversidad de formas y de propiedades se perfila una unidad de composición y de funcionamiento en el mundo vivo. Es como si la naturaleza hubiese empleado siempre los mismos materiales para producir los mismos constituyentes, como si no conociera más que una manera de proceder.

Sin embargo, hasta mediados de este siglo cualquier semejanza entre microorganismos y seres superiores parecía excluida por lo menos en un dominio: el de la herencia. Convertido tardíamente en unidad de mutación y de función, el gen era sobre todo la unidad de recombinación y de segregación. La genética se basa en el estudio de los híbridos que se reproducen por vía sexual. La asociación del análisis genético con la observación citológica permitió determinar el papel de los cromosomas y la mecánica de la herencia. Sin embargo, nada de esto podía hacerse con los microbios. Los microbios se reproducían por vía vegetativa y no había nada en ellos que recordara la sexualidad, por lo que no se podía recurrir ni a la hibridación ni a la citología. Su pequeño tamaño impedía todo examen citológico. La ausencia de organización no permitía distinguir entre lo somático y lo germinal, entre carácter y factor, entre fenotipo y genotipo. Bacteriólogos y genéticos concluían, de común acuerdo, que las bacterias estaban desprovistas de aparato genético y que su herencia no tenía nada en común con la de animales y plantas. El mundo de los microbios parecía inaccesible a los conceptos y métodos de la genética.

Los microorganismos no fueron objeto de análisis genético hasta mediados del presente siglo. Primero se observan fenómenos de sexualidad y de conjugación en mohos y levaduras. En estos organismos se puede asociar el estudio del metabolismo con el de la herencia. Los caracteres considerados ya no son sólo cualidades secundarias como la longitud de un ala o el color de una flor. Es la química misma del organismo, su poder de crecimiento y sus facultades de síntesis. Por primera vez, un genético y un bioquímico se asocian para estudiar un moho que se multiplica en un medio simple. El genético aísla los mutantes incapaces de crecer en este medio. El bioquímico intenta explicar esta incapacidad. Lo que se revela entonces es que cada una de estas mutaciones bloquea el metabolismo en un cierto punto. Cada una impide la síntesis de un metabolito esencial. Cada una altera la cualidad de una enzima que interviene en la síntesis. Toda la química del organismo está regida por su herencia. Un gen particular gobierna una reacción química concreta porque determina las propiedades de la proteína-enzima particular que cataliza esta reacción. En el vacío antes existente entre el gen y el carácter viene a situarse la proteína.

Las reacciones metabólicas se convierten así en objetos de estudio para la genética, lo que hace posible analizar la herencia de organismos tan simples como las bacterias. Las propiedades que hasta entonces habían excluido a las bacterias de la genética las convierten en un material particularmente adecuado para el estudio de la variación. Por su pequeño tamaño y la rapidez de su crecimiento, las bacterias producen enormes poblaciones en cuestión de horas y en espacios reducidos. Aplicando a estos cultivos los métodos estadísticos, se constata que la variación es consecuencia de cambios cuánticos ocasionales, idénticos a las mutaciones de los seres superiores. Al igual que las moscas, las bacterias poseen determinantes hereditarios factoriales, es decir, genes. Estos gobiernan tanto la morfología como el metabolismo y el conjunto de propiedades que se revelan. En algunos microbios se dan fenómenos de conjugación que recuerdan la sexualidad de los organismos superiores, lo que permite efectuar hibridaciones y precisar las relaciones genéticas. Se descubre que los genes bacterianos están dispuestos a lo largo de estructuras lineales semejantes a los cromosomas de los seres superiores. Lo mismo ocurre con los virus. Así pues, en el conjunto del mundo vivo no hay más

que una manera de asegurar la permanencia de las formas y las propiedades a través de las generaciones, y una sola manera de modificarlas. Las reglas del juego genético son las mismas para todos.

Hasta entonces la reproducción sexual se presentaba como el único medio de distribuir los genes de una especie en combinaciones tan numerosas que permitieran una variedad casi infinita de individuos. Sin embargo, en el mundo bacteriano hay otros medios aparte del sexo para transferir material genético de una célula a otra. Los virus pueden servir de vehículos a los genes bacterianos y llevar a cabo una especie de herencia infecciosa. Ciertas bacterias son capaces de absorber y de incorporar en su propio cromosoma los genes liberados por la disgregación de otras bacterias. Así pues, es falsa la correlación establecida entre la herencia y la reproducción sexual. La noción de herencia debe ampliarse. El principio central de la herencia es la capacidad de la célula de reproducirse idénticamente y que se transmite de generación en generación, la propiedad de reproducir estructuras y reacciones a través de la multiplicación. Sin ella no hay organismo vivo. El resto, la sexualidad, la diversidad de formas, la diferenciación celular, no son más que complicaciones elaboradas en el curso de la evolución, variaciones sobre un mismo tema fundamental. Se puede perfectamente concebir un universo, más bien aburrido, sin sexo, sin hormonas y sin sistema nervioso; un universo poblado solamente por células idénticas que se reproducen hasta el infinito. De hecho, este universo existe: es el constituido por un cultivo de bacterias.

El empleo de cultivos bacterianos como objeto de estudio comporta dos consecuencias importantes. La primera es que da acceso a la estructura íntima del material genético. Con las bacterias, el análisis genético se simplifica al máximo y adquiere un poder de resolución desconocido en el estudio de organismos complejos. El simple procedimiento de disponer cultivos de microbios en medios selectivos permite obtener en pocas horas informaciones sobre miles de millones de eventos, mutaciones o recombinaciones. Es difícil imaginar el trabajo que supondría obtener un resultado equivalente a base de examinar animales o plantas. Este aumento del poder de resolución lleva a una revisión de la imagen de estructura integral, como la cuenta de un rosario, atribuida al gen por la genética clásica. El gen definido como unidad de función contiene cente-

nares de elementos modificables por mutación y separables por recombinación. Sin embargo, esta organización nueva sigue obedeciendo los viejos principios: la naturaleza cuántica de la variación, el papel del azar en las combinaciones sometidas a las leyes probabilísticas, la disposición de los elementos a lo largo de una estructura unidimensional. Además, las bacterias permiten conocer a fondo la química del material genético. El hecho de que los genes liberados por bacterias disgregadas puedan penetrar en otras bacterias y conferirles caracteres nuevos da al químico opción de intervenir. Los genes sueltos pueden aislarse y purificarse como cualquier otro compuesto. Así es como Avery detecta la actividad genética ligada a la presencia del ácido desoxirribonucleico. La presencia de esta sustancia en el núcleo de las células se conocía desde hacía casi un siglo, así como su composición global. Sin embargo, hasta entonces no se sabía qué función atribuirle ni cómo determinar su estructura molecular. Su papel consiste en portar la especificidad de las unidades mendelianas. Su estructura puede resolverse mediante la combinación del análisis químico y la cristalografía. Se trata de un polímero formado por el alineamiento de millones de unidades de cuatro tipos, que se repiten y permutan como los signos de un alfabeto a lo largo de un texto. El orden de estas cuatro unidades dirige el de las veinte unidades proteínicas. Todo conduce a contemplar la secuencia contenida en el material genético como una serie de instrucciones que especifican las estructuras moleculares y, por consiguiente, las propiedades de la célula; a considerar el plan del organismo como un mensaje transmitido de generación en generación; a ver en la combinatoria de los cuatro radicales químicos un sistema de numeración de base cuatro. En resumen, todo invita a asimilar la lógica de la herencia a la de una computadora. Raramente un modelo impuesto por una época encontrará una aplicación más fiel.

La utilización de cultivos bacterianos por disciplinas distintas tiene una consecuencia añadida: con unos organismos tan rudimentarios, las técnicas se simplifican hasta el punto de poderse emplear simultáneamente. Para analizar la herencia no basta con observar los caracteres de la célula bacteriana, sus variaciones y su recombinación en los híbridos. Hay que extraer el material genético, precisar su estructura y medir sus propiedades en una centrifugadora. Paralelamente, hay que analizar las proteínas correspondientes, precisar su estructura y valorar su actividad

enzimática. De este modo se pueden seguir los efectos de una mutación, no sólo por los cambios funcionales que provoca, sino por las modificaciones de las estructuras en juego. Inversamente, es posible analizar las propiedades de una célula, su organización y su funcionamiento conforme a la naturaleza de las lesiones que entrañan las mutaciones. El análisis genético ya no se limita a desmontar el mecanismo de la herencia, sino que se convierte en un útil de precisión que sirve para revelar los constituyentes de la célula, su papel y las interacciones con los otros elementos. Mediante las mutaciones se intenta disecar la célula sin destruirla. Desde hacía más de un siglo, el estudio de lo patológico constituía uno de los métodos más seguros para interpretar lo normal. La fisiología experimental intervenía desde fuera para provocar lesiones en el organismo por acción mecánica o por efecto de tóxicos. La biología molecular las provoca desde dentro, como consecuencia de mutaciones, y persigue alcanzar no las estructuras ya formadas, sino el programa que dirige la elaboración. La presión selectiva ejercida sobre una población de bacterias en el laboratorio puede llegar a ser lo bastante eficaz para obtener casi a voluntad monstruos en los que la función escogida resulte deteriorada por alguna mutación. Los fisiólogos y morfólogos analizan tales aberraciones sobre organismos completos, mientras que los bioquímicos y biofísicos lo hacen sobre extractos. Ambos dominios de investigación ya no se ignoran, sino que constituyen dos aspectos de un mismo análisis.

Toda la historia de la biología está dominada por un conflicto entre dos posiciones contrarias, entre la esperanza de remitir las acciones de los organismos a las propiedades de la materia y el rechazo de la negación de toda cualidad particular a la integración de los seres vivos. Por un lado, a medida que se refina el análisis químico, más patente se hace la identidad de las leyes que rigen el mundo viviente y el mundo inanimado. Por otro, a medida que se amplía el estudio de los organismos vivos, su comportamiento y su evolución, más se evidencian las rupturas que se operan en cada nivel de integración. Del virus al hombre, de la célula a la especie, la biología se interesa por sistemas de complejidad creciente, por la integración sucesiva de sistemas inferiores. Cada nivel de organización representa un umbral donde cambian bruscamente los objetos, los métodos y las condiciones de observación. Los fenómenos que se revelan a un

nivel desaparecen en el nivel inferior, y su interpretación deja de ser válida en el nivel superior.

Se trata, por lo tanto, de articular esos niveles dos a dos, de franquear cada umbral y hacer aparentes las singularidades de integración y de lógica. Las bacterias constituyen, por así decirlo, un mínimo vital. Con ellas la biología molecular establece el primer nivel de integración organísmica, ignorando los otros. Se instala deliberadamente en la frontera del mundo vivo, en el límite con lo inanimado. El nivel inferior se describe en términos de física y de química. El nivel superior en términos de organización, de sistema lógico, de máquina automática incluso, lo que después de todo no es más que una revancha. Sin embargo, la naturaleza del sistema y los métodos de observación permiten siempre considerar los dos niveles juntos, comparar continuamente la totalidad del organismo con los constituyentes o los fenómenos detallados que evidencia el análisis. Nuestro conocimiento de la célula bacteriana es producto de la confluencia de distintas técnicas practicadas sobre el organismo entero o sobre extractos; más concretamente, de la combinación en cada etapa del análisis genético y del análisis fisicoquímico. Para reconocer los constituyentes y estudiar su funcionamiento, es preciso destruir la integridad de la célula. Pero hay que recurrir a la célula intacta para verificar que, después de su extracción y purificación, los compuestos aislados actúan tanto en el tubo de ensayo como en el organismo. La descripción de la célula bacteriana es el resultado de la comparación de ambos niveles.

## El mensaje

Cuando se trata de bacterias el individuo raramente es objeto de análisis. Normalmente, la experimentación pone en juego un cultivo, es decir, un medio que contiene poblaciones de miles de millones de microbios congregados en unos cuantos centímetros cúbicos. No existe, por lo tanto, ninguna posibilidad de observar rasgos individuales. Cuando se quiere observar la presencia de individuos concretos — mutantes por ejemplo— no hay más remedio que colocar la población en unas condiciones tales que sólo esos individuos puedan multiplicarse. Lo que se observa entonces no son los individuos mismos, sino su descendencia, es decir, otra vez una población. La representación que se forma el biólogo

de la célula bacteriana no es más que una imagen estadística, una especie de retrato robot que emerge de la acumulación de observaciones sobre un gran número de individuos.

Este retrato robot representa el objeto más simple que reúne las cualidades de organización, de autonomía y de invariancia que, por convención, caracterizan al ser vivo. Es cierto que existen organizaciones aún más rudimentarias, como los virus, pero éstos, aunque manifiestan ciertas propiedades de los organismos, están lejos de poseerlas todas. Su falta de autonomía impide que se les reconozca como seres vivos. En cuanto a las células de los seres superiores o de organismos unicelulares como los protozoarios o las levaduras, se observa en ellas una complejidad de organización muy superior a la de las bacterias.

La simplicidad relativa de la célula bacteriana no permite afirmar su carácter arcaico desde el punto de vista evolutivo. Es tentador relacionar simplicidad con arcaísmo y considerar la célula bacteriana como un fósil viviente, el ancestro de todas las otras formas de vida. No obstante, cualquier ser vivo, de la bacteria al mamífero, que examina el biólogo, procede de una evolución que ha durado miles de millones de años. Cuando los caminos seguidos por esta evolución ya no se encuentran jalonados por rastros reveladores, sus recovecos corren el riesgo de quedar desconocidos para siempre. Nada permite medir el parentesco entre los organismos primitivos y las bacterias actuales. Aun suponiendo que el material inicial de la evolución tuviese alguna semejanza con la célula bacteriana actual, no por ello puede imaginarse que tuviera su desconcertante complejidad. Detrás de cada bacteria que consideramos, detrás de cada uno de sus constituyentes, hay una larga historia tan necesaria para la inteligencia del sistema como para el conocimiento de su estructura. Por razones técnicas, el estudio de la célula bacteriana se ha concentrado en un colibacilo inofensivo, un organismo que alberga el intestino humano. Este colibacilo se multiplica perfectamente en un medio que contenga algunas sales minerales simples y un compuesto orgánico —un azúcar, por ejemplo— que sirve a la vez de fuente de carbono y de energía; nada que el químico no sepa producir a partir de elementos simples. Se puede cultivar igualmente el colibacilo en un medio más complejo, como caldo de carne, que contiene una variedad de productos orgánicos.

La presencia de compuestos necesarios para el crecimiento permite entonces a la célula bacteriana ahorrarse su síntesis y, en consecuencia, multiplicarse más rápidamente. En las condiciones más favorables de temperatura y ventilación, nuestro colibacilo puede reproducirse cada veinte minutos. Durante veinte minutos, la bacteria crece y se alarga, después de lo cual se divide por la mitad, produciendo de este modo dos bacterias idénticas entre sí e idénticas a aquella de la que nacieron.

Un colibacilo es un ser demasiado pequeño para poderse distinguir a simple vista. Al microscopio óptico aparece como una forma alargada, de alrededor de una micra y media. Pero no se distingue ninguna estructura. Al microscopio electrónico, las fotografías de cortes practicados sobre bacterias previamente fijadas y sombreadas recuerdan los paisajes lunares. Sólo a fuerza de perseverancia, y combinando las técnicas más variadas, han podido identificarse las raras estructuras visibles. En las micrografías electrónicas la célula bacteriana aparece como una bolsita cuya forma se mantiene gracias a la existencia de una pared rígida. Bajo la pared se encuentra una membrana de dos capas que separa físicamente la célula del medio externo. Impermeable a ciertas sustancias, la membrana impide la pérdida de moléculas elaboradas por la propia célula; en cambio, deja circular libremente ciertas sales minerales. Además, gracias a una suerte de bomba química localizada en dicha membrana, la célula bacteriana puede absorber y concentrar ciertos compuestos, como los azúcares que encuentra en el medio y que necesita para su metabolismo. Pero incluso el microscopio electrónico sólo permite distinguir en el interior de la bolsa un número reducido de estructuras definidas. En la región central aparece una masa densa formada, según parece, por fibras replegadas sobre sí mismas y enroscadas en ovillo: es la larga fibra que con tiene el programa genético. Aparte de esto, dentro de la bolsa se observan unos cuantos miles de gránulos esféricos de corte homogéneo: ahí es donde se sintetizan las proteínas.

Al abrir la bolsa, el químico encuentra varios miles de especies moleculares. Pero éstas no forman una serie continua, sino que pueden ordenarse en dos categorías muy distintas en cuanto a tamaño. Cerca de la mitad comprende moléculas bastante pequeñas, que no superan las quinientas o seiscientas unidades de peso molecular. La otra mitad, por el contrario, comprende moléculas muy grandes, por encima de las diez o

veinte mil unidades. No hay tamaños intermedios entre ambas clases. Aunque a primera vista llama la atención, esta repartición se explica por la manera en que se elaboran los constituyentes celulares. Construir pieza por pieza, átomo por átomo, las enormes arquitecturas moleculares representa para la célula una tarea a la vez compleja y costosa. Este proceso se verifica en dos etapas. En la primera, los elementos de construcción presentes en el medio se combinan a través de una serie de transformaciones. Uno a uno o agrupados, estos elementos son constantemente intercambiados, desplazados, añadidos o sustraídos. Esta primera parte del trabajo consiste esencialmente en enlazar átomos de carbono. Así se van elaborando esqueletos de estructura diversa, alargados o cerrados sobre sí mismos, de los que cuelgan otros átomos. Toda esta actividad pone en juego centenares de reacciones, pero solamente se produce un número limitado de compuestos pequeños, unas cuantas decenas a lo más. En la segunda etapa de la química celular, las moléculas pequeñas se encadenan para producir las grandes. Las cadenas características de las macromoléculas se forman por la polimerización de gran número de unidades moleculares. Cada enlace químico es, por lo tanto, idéntico a los otros: se trata de ir añadiendo unidades a una cadena en formación. Sólo con variar la longitud de la cadena y el orden de las unidades, la célula puede construir una diversidad considerable de arquitecturas de gran tamaño con un número limitado de radicales simples. Las dos etapas de la química celular difieren por su función, sus productos y su naturaleza. La primera forja los motivos químicos, la segunda los ensambla. La primera forma compuestos cuya existencia es temporal, pues se trata de intermediarios en los procesos de biosíntesis; la segunda construye productos estables. La primera pone en juego diversas reacciones; la segunda repite siempre la misma.

De este modo, a través de una serie de transformaciones que ponen en juego compuestos pequeños, la célula bacteriana canaliza la energía que extrae del medio. En el mundo bacteriano hay varias maneras de procurarse energía: por absorción de la luz solar, por oxidación de productos minerales o por oxidación de compuestos orgánicos. Sin embargo, para acumular energía y transferirla, la célula bacteriana funciona igual que el resto de seres vivos. El mismo compuesto fosforado se encarga de almacenar la energía recogida; su hidrólisis la moviliza cuando se necesita.

Nuestro colibacilo sólo sabe extraer su energía de la degradación de compuestos orgánicos como los azúcares. En una molécula de glucosa, por ejemplo, los átomos están dispuestos en una estructura bien definida, según un orden preciso en el espacio. Al destruir la molécula y desorganizar su estructura, la célula bacteriana convierte el orden inicialmente contenido en la glucosa en energía química. Esta se utiliza entonces para la síntesis de los constituyentes bacterianos, es decir, para el establecimiento de un orden molecular distinto, el de la célula. En definitiva, la movilización de la energía se traduce en una transferencia de organización, en la conversión de un orden externo en orden celular. Para degradar una molécula de azúcar, la célula procede paso a paso, en una serie de reacciones sucesivas. En cada etapa se libera un cuanto de energía que se recoge en la forma de una molécula fosforada. Gracias a esta destrucción calculada, las transferencias de energía se efectúan en la célula con un rendimiento considerable.

Si queremos proceder por analogía, lo que mejor describe la célula bacteriana es evidentemente el modelo de una fábrica química en miniatura. Fábrica y bacteria funcionan gracias a la energía que reciben del exterior. Ambas transforman, mediante una serie de operaciones, la materia prima extraída del medio en productos elaborados. Ambas arrojan al exterior sus desechos. Sin embargo, la idea de fábrica implica una orientación de los esfuerzos, una dirección del trabajo y una voluntad de producción; en resumen, un objetivo en torno del cual se diseña la arquitectura y se coordinan las actividades. ¿Cuál puede ser entonces el objetivo de la bacteria? ¿Qué producción justifica su existencia, determina su organización y da sentido a su trabajo? Sólo parece haber una respuesta a esta pregunta. Lo que persigue una bacteria es producir otra bacteria. Éste parece ser su único plan, su única ambición. La pequeña célula bacteriana ejecuta con diligencia las cerca de dos mil reacciones que componen su metabolismo, crece, se alarga poco a poco y, cuando llega el momento, se divide. Donde había un individuo, ahora hay dos. Cada uno de ellos se convierte entonces en el centro de todas las reacciones químicas. Cada uno reconstruye el conjunto de estructuras moleculares. Cada uno crece de nuevo. Al cabo de unos minutos, cada uno se divide a su vez para producir dos individuos; y así sucesivamente, mientras lo permitan las condiciones de cultivo.

Las bacterias, o algo parecido, han estado reproduciéndose desde hace más de dos mil millones de años. Toda la estructura de la célula bacteriana, todo su funcionamiento, toda su química, se han ido refinando con vistas a este solo objetivo: producir dos copias idénticas de un organismo, lo mejor y más rápidamente posible, y en las condiciones más variadas. Si se quiere contemplar la célula bacteriana como una fábrica, entonces hay que considerarla una fábrica de un tipo muy particular. Los productos fabricados por la tecnología humana difieren totalmente de las máquinas que los producen y, por lo tanto, de la propia fábrica. Lo que elabora la célula bacteriana, en cambio, son sus propios constituyentes, y el producto final es una copia de sí misma. La fábrica produce; la célula se reproduce.

Las síntesis celulares por cambios secuenciales o por polimerización no se distinguen fundamentalmente de las que realiza el químico orgánico en el laboratorio. En las transformaciones que se verifican en la célula no existe un misterio particular, no hay materiales desconocidos, reacciones ni enlaces químicos que estén fuera del alcance del laboratorio. No sólo el químico es capaz de preparar muchos de los compuestos que encontramos en la célula, sino que cierto número de ellos se forman incluso espontáneamente en las condiciones que, según parece, debieron prevalecer en la superficie planetaria antes de la aparición de los seres vivos. Es lo que ocurre, por ejemplo, cuando soluciones de sales minerales convenientemente escogidas son «excitadas» con descargas de energía, sobre todo bajo el efecto de los rayos ultravioleta. Ni en las materias primas, ni en la naturaleza de las reacciones, ni en el tipo de enlaces formados, aparece discontinuidad alguna entre la química de lo viviente y la de la materia inerte.

Sin embargo, aunque el laboratorio y la industria sean capaces de producir compuestos característicos de la célula, sólo lo consiguen al precio de un equipamiento caro y engorroso, un rendimiento deplorable y condiciones de temperatura, presión y acidez casi siempre incompatibles con la vida. Mientras tanto, nuestra célula bacteriana efectúa cerca de dos mil reacciones distintas, de un virtuosismo inigualable y en un espacio minúsculo. Dos mil reacciones que divergen, se entrecruzan y convergen a toda velocidad sin enmarañarse nunca; que producen con exactitud cualitativa y cuantitativa las especies moleculares necesarias para el

crecimiento y la reproducción; y todo con un rendimiento cercano al cien por cien. La química de lo viviente difiere de la del laboratorio no en la naturaleza del trabajo realizado, sino en las condiciones de trabajo.

Después de mucho tiempo, por lo tanto, el químico desvela al fin el secreto de la célula: es el empleo de catalizadores, es decir, sustancias que, sin participar en la reacción misma, sin quedar químicamente transformadas por ella, la activan. La mayoría de las reacciones químicas se producen espontáneamente, pero con una lentitud extraordinaria en las condiciones del laboratorio o del interior de la célula. El catalizador sólo aumenta la velocidad de reacción. Pero, mientras los catalizadores de laboratorio son casi siempre inespecíficos y activan reacciones muy diversas, los de los seres vivos son rigurosamente específicos. Para cada reacción química en la célula existe un catalizador particular, una enzima y sólo una. Cada catalizador activa una reacción celular concreta y sólo esa. Para efectuar sus dos mil operaciones químicas, la célula debe producir, por lo tanto, dos mil especies enzimáticas. Estas pertenecen a una misma familia de moléculas, las proteínas. No todas las proteínas celulares son enzimas, pero todas las enzimas son proteínas. Cada enzima contiene varios miles de átomos dispuestos en un orden riguroso. La geometría de la estructura es la que le confiere sus propiedades. El cambio de un solo radical químico, el desplazamiento de unos pocos átomos, puede bastar para deformar la molécula y hacerle perder su función.

Toda la química celular, con su precisión y su eficacia, se basa en las cualidades de unas dos mil proteínas-enzimas que catalizan las reacciones del metabolismo. Lo que se reproduce con exactitud en cada generación no es sólo la célula bacteriana en su conjunto sino cada una de las enzimas que regulan la química, cada una de las especies moleculares que la constituyen. La extracción y el estudio de una proteína exige un cultivo de por lo menos un billón de bacterias. Una sola de estas bacterias contiene miles de especies moleculares. Sin embargo, el químico logra de hecho aislar y purificar la proteína en cuestión a partir de ese batiburrillo, y luego es capaz de analizar su composición y determinar la secuencia de las unidades básicas en la cadena; y el cristalógrafo, por su parte, es capaz de precisar la organización de la molécula y localizar la posición exacta de cada átomo. Esto significa que los millares de moléculas de la proteína sintetizados por cada una de las bacterias de la po-

blación poseen exactamente las mismas propiedades y están constituidas por las mismas unidades dispuestas según la misma secuencia; todas tienen exactamente la misma estructura y los mismos átomos distribuidos de la misma manera. En resumen, todas las bacterias del cultivo producen rigurosamente las mismas especies moleculares. Los errores son tan infrecuentes que resultan indetectables.

La permanencia de un ser vivo a través de las generaciones se refiere no sólo a su forma, sino también a los detalles de las sustancias componentes. Cada especie química se reproduce exactamente de una generación a otra. Sin embargo, una proteína no nace de otra proteína idéntica. Las proteínas como tales no se reproducen, sino que se organizan a partir de otra sustancia, el ácido desoxirribonucleico, la sustancia de los cromosomas. Sólo este compuesto posee la propiedad de copiarse a sí mismo. Esto es posible por la singularidad de su estructura. Se trata de un polímero muy largo formado no por una, sino por dos cadenas enrolladas en hélice una alrededor de la otra. Cada una de las cadenas consta de un esqueleto formado por moléculas de azúcar y fosfato alternadas. Cada molécula de azúcar se enlaza con otro radical químico de un conjunto de sólo cuatro especies. Estas cuatro unidades se repiten por millones a lo largo de la cadena, lo que permite un número incontable de variaciones. Esta secuencia lineal suele compararse, por analogía, con la de los signos de un alfabeto a lo largo de un texto. La especificidad de un libro o de un cromosoma nace del orden en que se disponen las unidades, sean letras o radicales nucleicos. Sin embargo, lo que confiere a este polímero un papel central en la reproducción es la naturaleza de la relación entre ambas cadenas. Cada unidad de una cadena se liga a una unidad de la otra, pero no una cualquiera. Si designarnos los cuatro radicales nucleicos por A, B, C y D, la presencia de A en una cadena entraña necesariamente la de B en la otra, y enfrente de C siempre se sitúa D. Los signos se ligan por pares complementarios. Así pues, una y otra cadena, son complementarias, lo que quiere decir que la secuencia de una determina la de la otra.

Es esta estructura tan peculiar lo que permite la reproducción exacta de la fibra de ácido nucleico. Al ser complementarias, cada cadena contiene las particularidades de la secuencia. La reproducción de la molécula es el resultado de la separación de ambas cadenas seguida de la reconsti-

tución por cada una de ellas de la cadena complementaria. Puesto que A sólo puede ligarse a B, etc., cada cadena puede dirigir la síntesis de la secuencia complementaria sin ninguna ambigüedad. Este mecanismo, algo desconcertante por su simplicidad, da lugar a dos moléculas idénticas a partir de la estructura inicial. Reproducir la fibra cromosómica supone copiarla de alguna manera signo por signo. Las fuerzas que intervienen en el reconocimiento de cada unidad y su colocación son las mismas que rigen la formación de los cristales. Para efectuar la polimerización, es decir, para enlazar cada radical a su precedente, sólo se requieren unas cuantas enzimas. Una de estas enzimas es capaz de copiar un ácido desoxirribonucleico en un tubo de ensayo si se le suministran los ingredientes necesarios, esto es, los cuatro radicales básicos. Se ha descubierto también en la célula bacteriana la existencia de verdaderos sistemas de reparación que revisan, por así decirlo, las copias reproducidas para verificar su fidelidad y corregir ciertos errores.

La fibra nucleica, el único constituyente bacteriano capaz de copiarse a sí mismo, perpetúa la estructura de las otras especies químicas a través de las generaciones. Su papel consiste en dirigir la síntesis de las proteínas y guiar la organización. Un gen particular corresponde a un segmento particular de la cadena nucleica, en el cual se cifran, en un sistema de numeración de base cuatro, las instrucciones necesarias para la construcción de una proteína particular. Ácido nucleico y proteína son polímeros lineales. Cada cual se caracteriza por la secuencia de unidades a lo largo de la cadena. El ácido nucleico determina la secuencia de la proteína. El orden de las unidades nucleicas determina el de las unidades proteicas. Es un proceso de sentido único, puesto que la transferencia de información se efectúa siempre del ácido nucleico a la proteína, nunca en sentido inverso. Pero, mientras que la combinatoria nucleica sólo emplea cuatro motivos químicos, la de las proteínas utiliza veinte. La actividad del gen, la ejecución de las instrucciones para la síntesis de proteínas exige, por lo tanto, una transformación unívoca de un sistema de símbolos en el otro.

La vieja representación del gen, la estructura integral en rosario que imaginaba la genética clásica, ha sido sustituida por la de una secuencia lineal de motivos químicos, el cristal aperiódico que habían predicho los físicos. La imagen que describe mejor nuestro conocimiento de la herencia es la de un mensaje químico. Un mensaje escrito no en ideogramas al

estilo chino, sino en un alfabeto. Así como una frase constituye un segmento de texto, un gen corresponde a un segmento de ácido nucleico. En uno y otro caso, un símbolo aislado no representa nada; sólo tiene «sentido» la combinación de signos. Una secuencia dada, frase o gen, empieza y termina con signos especiales de «puntuación». La traducción de la secuencia nucleica en secuencia proteica se parece a la conversión de un mensaje escrito en Morse, que no adquiere sentido hasta que se descifra y se escribe, por ejemplo, en castellano. Esta conversión se efectúa mediante un «código» que da la equivalencia de los signos entre los dos «alfabetos».

La actividad de los genes, el ordenamiento de las unidades en las cadenas proteicas representa, por lo tanto, un trabajo mucho más sutil que su reproducción, el ordenamiento de las unidades nucleicas. Para la traducción y la formación de los enlaces químicos de las proteínas, la célula bacteriana pone en funcionamiento un mecanismo muy complejo. La síntesis de proteínas se efectúa en dos etapas sucesivas, pues las unidades proteicas se ensamblan y polimerizan no directamente sobre el gen, sino en el citoplasma, sobre pequeños gránulos que constituyen verdaderas cadenas de montaje. El texto nucleico del gen se transcribe primero, en el mismo alfabeto de cuatro signos, en otra especie de ácido nucleico. Esta copia, que recibe el nombre de «mensajero», se asocia a los gránulos citoplasmáticos para darles las instrucciones que les permitirán ensamblar las unidades proteicas según el orden dictado por la secuencia de nucleótidos. Ahí es donde se efectúa la traducción del texto genético recopiado en el mensajero, con la intervención de otras moléculas llamadas «adaptadoras». Estas disponen las unidades proteicas apropiadas frente a las unidades nucleicas, estableciendo así una correspondencia unívoca entre ambos alfabetos. Cargados con sus adaptadores, los gránulos se desplazan de un extremo al otro del mensajero, como el cabezal de un magnetófono a lo largo de una cinta magnética. Cada unidad proteica ensamblada se une a la precedente mediante el mismo enlace químico. La cadena se sintetiza así paso a paso de un extremo a otro.

El código genético ha sido ya descifrado. A cada unidad proteica le corresponde una combinación particular de tres unidades nucleicas, un triplete. Dado que con cuatro nucleótidos distintos pueden formarse sesenta y cuatro tripletes posibles, la célula dispone de un «diccionario» de

sesenta y cuatro términos genéticos. Dos o tres de estos tripletes son signos de puntuación, es decir, indican en el texto nucleico el principio y el fin de una cadena proteica. Cada uno de los otros tripletes «significa» una unidad proteica. Como el número de estas unidades proteicas no pasa de veinte, hay más de un triplete para cada una, lo que quiere decir que el diccionario nucleico contiene sinónimos. Esto confiere cierta flexibilidad a la escritura de la herencia. Todos los organismos, del hombre a la bacteria, están capacitados para interpretar correctamente cualquier mensaje genético. El código genético parece ser universal y su clave conocida por todo el mundo vivo.

Una vez ordenadas y enlazadas las unidades proteicas, la cadena se repliega sobre sí misma adoptando un diseño complicado y único. La proteína adquiere así su forma definitiva, la cual le confiere sus propiedades particulares, catalíticas o de otro tipo. El mecanismo de esta transformación de una estructura unidimensional en otra tridimensional no se conoce todavía en todos sus detalles. No exige ningún factor especial fuera de los que intervienen en su síntesis. Parece ser, por lo tanto, que se realiza espontáneamente a través del juego de interacciones entre los radicales químicos repartidos a lo largo de la cadena. Ciertos grupos de átomos se atraen, otros se repelen, de manera que basta con que se constituya la secuencia para que adopte por sí sola un determinado orden espacial, una configuración rigurosamente definida. Si se desnaturalizan las proteínas por la acción de ciertos compuestos, la molécula pierde su forma, se desdobla y retorna al estado de cadena lineal. Puestas de nuevo en condiciones fisiológicas, algunas cadenas recuperan su estructura específica y otras no. Según parece, éstas últimas adquieren su configuración durante la síntesis por la formación de algún «núcleo» en torno al cual se organiza el resto de la molécula. En cualquier caso, en esta última etapa clave de la reproducción molecular, la transformación del plano en el edificio, la conversión de lo potencial en funcional, sólo intervienen interacciones físicas.

La célula bacteriana contiene una sola molécula de ácido desoxirribonucleico, una larga fibra en la que se alinean cerca de diez millones de signos. Su longitud, superior al milímetro, es casi diez mil veces mayor que el diámetro de la célula que la contiene, enroscada en ovillo. Durante el crecimiento bacteriano la fibra se reproduce una sola vez por genera-

ción, y cada una de las dos bacterias resultantes de la división celular se queda con un ejemplar. Esta molécula de ácido nucleico constituye el «cromosoma» de la bacteria, el cual contiene los genes necesarios para determinar la organización y el funcionamiento de la célula bacteriana. Todo el sistema se orienta hacia un solo objetivo: llevar a la bacteria a producir otras dos, cada una con un ejemplar del cromosoma, que sean capaces de duplicarse a su vez. Lo que está escrito en clave a lo largo de la cadena nucleica, lo que se vuelve a copiar signo a signo para ser transmitido escrupulosamente a las generaciones sucesivas, es la colección de los planos que detallan la arquitectura de la célula bacteriana, el conjunto de instrucciones que permiten construir minuciosamente toda la serie de edificios proteicos. El programa no se transcribe ni se traduce en bloque sino por segmentos. La lectura del mensaje se parece más a la consulta de un libro de instrucciones en función de las necesidades que a la lectura de un rollo de papel que se desenrolla de principio a fin. Algunas regiones del programa contienen directrices que remiten a otras regiones según los casos y precisan la conducta necesaria en una situación dada. Por ejemplo, en la página 35 se encuentran las instrucciones: construir el aparato que permite localizar en el medio de cultivo la presencia de galactosa; si se encuentra este azúcar, ejecutar las instrucciones de la página 241; en caso negativo, cerrar la página. Otro ejemplo: en la página 428 se encuentran los planos para la construcción de un aparato para medir la concentración citoplasmática de un metabolito esencial, la arginina; si la concentración supera cierto nivel, no hacer nada; si no, ejecutar las instrucciones de las páginas 19, 65, 155, 601 y 883. La mayoría de las situaciones que puede tener que afrontar un colibacilo están previstas en el mensaje. El programa contiene los planos de todas las piezas necesarias para construir una bacteria y, además, los medios para que ésta afronte las dificultades de la vida corriente. Pero no es más que un programa. En los procesos de copia, tanto en la reproducción como en la síntesis proteica, el ácido desoxirribonucleico ejerce el papel pasivo de una matriz. Fuera de la célula, sin los medios para ejecutar los planos, sin los aparatos de copia o traducción, permanece inerte, lo mismo que una cinta magnética fuera del magnetófono. La memoria de la célula, igual que la de una computadora, no puede actuar por sí sola. El mensaje genético funciona solamente en el seno de la célula. Lo único que puede hacer

es dirigir el comportamiento de los otros elementos celulares. Para que puedan producirse máquinas a partir de planos, hacen falta máquinas. Ninguna de las sustancias extraíbles de la célula tiene la propiedad de reproducirse. Sólo la bacteria, la célula intacta, es capaz de crecer y reproducirse, puesto que sólo ella posee a la vez el programa y su modo de empleo, los planos y los medios de ejecución.

## La regulación

Estos medios de ejecución son las proteínas. Sobre sus propiedades reposan todas las actividades de la célula, su arquitectura y su integración. Las proteínas no actúan formando enlaces químicos, sino asociándose a otros compuestos. Su estructura les confiere una virtud única: la de «reconocer» con exactitud una o más especies químicas dentro de la mezcla más heterogénea. La precisión de este reconocimiento y su especificidad determinan las relaciones que se establecen entre los constituyentes de la célula. Las proteínas gobiernan toda la química celular.

El hecho de que una enzima catalice la transformación de un metabolito dado, y sólo ese, significa que en las sinuosidades de su superficie existe una especie de hueco en el que se encastra esa especie molecular concreta. Una vez encajado el sustrato en su sitio, queda sometido a la influencia de los radicales proteicos que lo rodean. Esto perturba las fuerzas que ligan ciertos átomos del sustrato, lo que facilita la ruptura de algún enlace u otro cambio químico. El producto así formado ya no encaja bien en el hueco de la proteína y se desprende, dejando la proteína intacta y el sitio libre para otra molécula de sustrato. Todo ello en una ínfima fracción de segundo. El secreto de esta química reside en la precisión de los patrones químicos, en la adaptación de cada enzima a su sustrato, de lo que depende la eficiencia y la velocidad de las reacciones. Al ser reconocido por una enzima y sólo una, un metabolito sigue necesariamente el itinerario impuesto por la actividad catalítica de la enzima. Esta, por el contrario, está perfectamente «informada» de la naturaleza de una especie química e ignora las otras. Su estructura determina a la vez su elección y su interacción. La enzima posee las propiedades que Max-

well atribuía a su demonio[368]: en la mezcla de compuestos que contiene la célula «ve» una especie molecular y una sola capaz de abrirle las puertas de la reacción química. El rigor del orden que caracteriza los intercambios de materia y de energía en la célula se basan en la seguridad de esta elección.

La especificidad de las interacciones que establecen ciertas proteínas entre sí o con otros compuestos determina también la arquitectura de la célula. A pesar de su relativa simplicidad, la célula bacteriana contiene tal diversidad de especies químicas, es ya tan enormemente compleja, que resulta difícil hacerse una idea de su organización general. Sin embargo, empezamos a comprender lo que determina la forma de objetos más simples como los virus. Un virus es una partícula constituida por un fragmento de ácido nucleico rodeado por una envoltura de proteína. Desprovisto de enzimas y de la maquinaria química necesaria para la síntesis y para la movilización de la energía, el virus no puede reproducirse por sí mismo. Sólo puede hacerlo en el interior de las células que infecta, cuyos mecanismos utiliza en beneficio propio. Sólo dentro de una célula pueden ejecutarse las instrucciones contenidas en el ácido nucleico del virus para la síntesis de sus proteínas y la reproducción de su ácido nucleico; las piezas separadas así fabricadas se ensamblan luego en nuevas partículas víricas que, una vez liberadas, pueden infectar otras células. Así pues, un virus se multiplica, no por crecimiento y división como una célula, sino por la producción independiente de sus constituyentes y su ensamblado posterior. Vemos, pues, que un virus posee algunas de las propiedades de un sistema vivo, pero no todas. Puede diseminarse, multiplicarse y sufrir mutaciones. Puede dirigir la producción de proteínas virales que influyen en favor suyo sobre el medio en que se encuentra. Puede también ser objeto de evolución por selección natural. Ahora bien, sólo puede ejecutar su programa genético y reproducirse en un medio capaz de efectuar las operaciones metabólicas necesarias, de producir energía y sintetizar polímeros, es decir, en una célula. No podemos, por lo tanto, considerar un virus como un organismo. Fuera de la célula, la partícula vírica es un objeto inerte. Sólo el sistema célula-virus posee todas las

[368] Wiener, *Cybernetics*, 2. ed., 1961, pág. 58.

propiedades de lo viviente. La infección vírica es la ruptura del orden celular que entraña la irrupción de un mensaje químico ajeno.

Existe una gran variedad de virus, de tamaños y formas muy diversos. En los más pequeños el ácido nucleico contiene sólo algunos millares de unidades básicas, lo necesario para codificar apenas tres o cuatro cadenas proteicas. La envoltura proteica de estos virus pequeños, con forma de bastoncillo o de esfera, está constituida por la reunión de varios ejemplares de una misma especie molecular. La arquitectura del virus queda definida por el conjunto de estas moléculas idénticas. Se pueden aislar y purificar las proteínas de la envoltura vírica. Puestas en solución en ciertas condiciones, las moléculas de esta proteína se asocian en un proceso parecido a la cristalización y originan partículas de forma idéntica a las del virus. Si la solución de proteína contiene además moléculas del ácido nucleico, el virus se reconstituye y las partículas formadas son infecciosas. De nuevo es la estructura particular de la proteína, la disposición de sus átomos, lo que le confiere el poder de asociarse selectivamente a otras proteínas idénticas en un montaje de simetría y forma rigurosamente definidas. Las moléculas de proteína se reconocen mutuamente y se ordenan de acuerdo con una geometría única, en virtud de ciertos patrones químicos. Para el establecimiento de la forma no es necesario ningún molde, ninguna fuente de energía, ninguna fuerza particular, salvo las acciones entre grupos de átomos gracias a las cuales se organizan y crecen los cristales en el mundo no vivo. Las mismas interacciones intervienen también en la elaboración de los virus más complejos, constituidos, por ejemplo, por una cabeza poliédrica soldada a una cola alargada. En este caso, no una sola sino varias especies de proteínas se ordenan y ensamblan formando patrones simétricos que componen la compleja estructura que alberga el ácido nucleico. Lo mismo ocurre con los orgánulos de la célula y los gránulos citoplasmáticos donde se efectúa la traducción del lenguaje nucleico en lenguaje proteico y el ensamblaje de las proteínas. Y también con los flagelos que adornan el contorno de la pequeña célula bacteriana.

Muchas formas celulares que nos causan admiración tienen las mismas propiedades que los cristales. La cristalización implica una unión de elementos semejantes, una geometría rigurosamente ordenada por las fuerzas que ordenan y ligan las moléculas idénticas. Ya sean partículas,

laminillas, fibras o túbulos, la mayoría de las estructuras que se revelan al microscopio presenta estas características. No se conoce aún plenamente la organización molecular de los orgánulos más complejos de la célula, especialmente la membrana. Pero es seguro que la construcción de estos orgánulos no desencadena ningún principio misterioso ni requiere ninguna fuerza desconocida por los físicos ni exige ningún factor que no esté contenido en la estructura misma de los constituyentes. La diversidad y la belleza de las formas, toda la maravillosa geometría de los seres vivos, parece basarse en un fenómeno conocido desde hace mucho tiempo: la formación de los cristales. Una vez más, entre el mundo viviente y el mundo inanimado existe una diferencia no de naturaleza, sino de complejidad. La integración de la célula bacteriana se asienta en las propiedades de ciertas proteínas y su capacidad de reconocer selectivamente otras especies moleculares. En un sistema tan complejo sólo la coordinación de los elementos da unidad al sistema. Formada por millares de especies moleculares, sede de millares de reacciones químicas que se desarrollan simultáneamente a toda velocidad, la célula bacteriana no puede constituir una totalidad funcional sin una estrecha cohesión de sus componentes. Todos los intercambios de materia y de energía deben regularse en detalle para que pueda cumplirse el designio de la bacteria: producir dos bacterias. La pequeña célula bacteriana no es, por lo tanto, una simple colección de especies moleculares encerradas en una bolsa y sometidas a las leyes estadísticas que regulan los elementos simplemente yuxtapuestos y mutuamente independientes; requiere una red de comunicación que conecte los constituyentes alejados unos de otros a escala atómica y coordine las actividades particulares en función del objetivo común. En todas las etapas de la química celular intervienen circuitos de regulación para coordinar las reacciones y ajustarlas a las exigencias de la producción. Con muy poco gasto de energía, la célula ajusta de este modo su trabajo a sus necesidades. Sólo produce lo que necesita, y cuando lo necesita. La fábrica química es completamente automática.

Coordinar las actividades químicas de la célula supone en primer lugar poner en marcha o, inversamente, parar las cadenas de reacciones según las condiciones presentes. Supone informar permanentemente a los agentes ejecutores sobre sus propias actividades para que puedan adaptarlas a la situación. Supone establecer interacciones entre constituyentes

separados por su estructura, pero unidos por su función. Solamente hay integración en la medida en que la rigidez de las consignas prescritas en el programa genético es compensada por la flexibilidad de las informaciones recogidas sobre la situación local, el estado del sistema y la naturaleza del medio. Este juego entre lo que hay que hacer y lo que ya está hecho determina en todo momento la actividad de cada constituyente. La existencia de estas interacciones libra al sistema de sus ligaduras termodinámicas y le da el poder de luchar contra la tendencia mecánica hacia el desorden. Ello exige que los órganos ejecutores estén acoplados a órganos de percepción capaces de «sondear» el mundo exterior, de descubrir la presencia de ciertos compuestos que actúan como señales y de medir su concentración. Este papel corresponde a ciertas proteínas, llamadas reguladoras, cuya estructura les confiere propiedades especiales. Estas proteínas tienen la capacidad de asociarse selectiva y reversiblemente no a una, sino a dos o más especies moleculares de distinta naturaleza y estructura, pero que no manifiestan ninguna reactividad química mutua. Sólo la mediación de la proteína reguladora puede inducir una interacción particular entre estos cuerpos que de otro modo se ignorarían químicamente. Estas proteínas constituyen, por así decirlo, estructuras de dos cabezas: la primera les permite reconocer una especie química determinada y realizar una función catalítica o de otro tipo; la segunda les permite fijar un compuesto totalmente distinto que modifica la configuración de la proteína y, en consecuencia, cambia las propiedades de la primera estructura. Según esté presente o no dicho compuesto, o supere o no cierta concentración, la proteína oscila entre el estado de actividad y el de no actividad. El compuesto modula el funcionamiento de la proteína y, al mismo tiempo, el de la cadena de reacciones de la que forma parte. De hecho actúa como una señal química para situar la proteína en posición en «marcha» o «paro». Estas proteínas reguladoras ejercen un papel acoplador entre las distintas funciones celulares, entre los millares de reacciones que concurren para almacenar o movilizar la energía y el potencial químico. Lo que confiere su valor a estas interacciones es que están libres de las principales restricciones sobre las reacciones químicas: al ser reversibles y no implicar verdaderos enlaces químicos, ponen en juego energías de activación débiles o nulas; al no estar sometidas a las reglas de afinidad y reactividad químicas, se ligan a cualquier especie

molecular. La naturaleza de las interacciones y su misma existencia se derivan únicamente de la organización de la molécula proteica, es decir, en última instancia, de una secuencia nucleica. Sin estos agentes asociativos, sin estas proteínas de función múltiple, la coordinación de la célula chocaría con obstáculos insuperables, tanto estructurales como termodinámicos. La simple presencia de estas estructuras establece una red de comunicación entre célula y medio, entre genes y citoplasma, y entre pares de constituyentes sin afinidad química.

En torno a estas proteínas se orquestan los circuitos de regulación. Como en electrónica, los mismos elementos pueden disponerse en una variedad de circuitos y realizar la función que impone la circunstancia. Las proteínas reguladoras revelan la presencia de un metabolito particular en el medio de cultivo, pero el efecto resultante varía según la naturaleza del compuesto y su papel en la economía celular. Si, por ejemplo, se trata de un azúcar que puede procurar energía, su presencia desencadena la síntesis de enzimas que lo degradan. Si, por el contrario, se trata de un metabolito esencial que la célula fabrica, su presencia en el medio de cultivo detiene la síntesis de los enzimas que favorecen su producción. En una cadena de reacciones, el producto final informa en todo momento a los agentes ejecutores del resultado de su actividad y, por consiguiente, les permite adaptarla. Cada metabolito sintetizado por la célula ajusta su propia producción a través de un bucle retroactivo.

Las proteínas reguladoras, al igual que los relés de las máquinas electrónicas, sólo reaccionan a la presencia de una señal química cuando ésta sobrepasa cierto nivel. Su respuesta es el resultado de la oscilación de la proteína entre dos estados posibles; representa una elección entre los dos términos de una alternativa, entre la actividad y la no actividad, entre el funcionamiento y el paro, entre sí y no. Todo lo que puede detectar la proteína es la presencia o la ausencia de un compuesto dado, de un motivo químico determinado. Sistemas binarios semejantes funcionan a todos los niveles del metabolismo para coordinar su diversidad. Intervienen a cada momento para adaptar las funciones a las necesidades de la célula y al estado del medio, para ajustar las actividades catalíticas en las cadenas de reacción; para determinar qué genes deben traducirse en proteínas, para autorizar, una vez por generación, y sólo una vez, la reproducción del cromosoma, y para coordinar la división celular. La integración de la

célula, la cohesión de sus actividades, se fundamentan enteramente en la existencia de estas estructuras proteicas, productos puros de la selección natural. Entre las especies moleculares más alejadas pueden establecerse todas las interacciones imaginables a condición de que exista la estructura proteica conveniente. De hecho, se observan las conexiones menos esperables químicamente, pero más eficaces desde el punto de vista lógico. Cuando se discierne una nueva vía metabólica y se descubre su mecanismo, se comprueba que ésta confiere infaliblemente a la célula una eficiencia de funcionamiento unida a una economía de medios. Es exactamente el tipo de ventaja que prima la reproducción. La lógica del sistema de regulación descansa en la ambición bacteriana de producir dos al precio de uno.

Se analicen las funciones, la morfología o la integración de la célula bacteriana, siempre será la familia de las proteínas la que ocupe el primer lugar. Éstas incluyen tanto los agentes ejecutores como las piezas del armazón o los órganos sensoriales. Sea cual fuere su papel, las proteínas se caracterizan por el hecho de unirse selectivamente a otros compuestos, lo que los químicos llaman asociaciones «no covalentes», es decir, que no implican enlaces químicos verdaderos. Lo que les otorga una posición privilegiada en la célula es el poder de reconocer específicamente ciertos patrones químicos en una mezcla, por compleja que sea. Por eso mismo, las proteínas están capacitadas para «palpar» de alguna manera las especies químicas, «sondear» la composición del medio y «percibir» estímulos específicos. Las proteínas funcionan, a todos los niveles, como demonios de Maxwell que luchan contra la tendencia mecánica hacia el desorden. Detentan el «saber» necesario para mantener la organización de la célula.

La existencia misma de cada interacción emana de la estructura de la proteína correspondiente. Esto significa que tanto la anatomía de la célula bacteriana como su fisiología se basan casi exclusivamente en las particularidades de algunas cadenas proteicas. Supone también que la reproducción de estas estructuras y, por lo tanto, de todo el sistema sólo es posible en la medida en que el orden molecular tridimensional esté completamente determinado por un orden unidimensional. La dificultad de copiar una arquitectura en el espacio ya fue subrayada por Buffon. La encontramos a todos los niveles, se trate de formas visibles o de molécu-

las. La biología molecular ha sustituido el modelo del molde interior por el del mensaje lineal. De todas las configuraciones de elementos materiales, la secuencia es, sin duda alguna, la que puede reproducirse más fielmente con menos gasto. Sólo hay una manera de representar la reproducción de un objeto, se trate del conjunto de caracteres de un organismo o de los átomos de una molécula: la colocación de cada elemento de la copia debe estar guiada por su homólogo en el original. Sólo es factible reproducir una cosa en la medida en que se pueda reconocer cada singularidad, cada motivo, cada detalle significativo. No es el caso de una estructura tridimensional, puesto que sólo la superficie es accesible. El crecimiento se limita entonces a la superposición de elementos nuevos en las regiones accesibles de la estructura. Es el mecanismo que rige la formación de un cristal mediante la repetición monótona del mismo patrón. Por el contrario, es perfectamente concebible la reproducción de una superficie en la que no haya detalles ocultos. Nada se opone en teoría a la reproducción exacta de una matriz de dos dimensiones o, mejor aún, de dos matrices que sean imágenes especulares una de otra. En la práctica, sin embargo, la copia de una tal estructura representa una operación mucho más compleja que la copia de una simple secuencia. Lo que da a la reproducción molecular su eficiencia, lo que la hace factible, es la existencia de una relación unívoca entre dos sistemas de orden: por un lado, la doble secuencia nucleica que conserva siempre su carácter lineal y puede copiarse sin dificultad; por otro, la secuencia proteica que se convierte espontáneamente y sin ambigüedad en estructuras tridimensionales específicas. La complejidad del espacio puede reproducirse porque se asienta en la simplicidad de una secuencia. Significa que, en el mundo vivo, el orden del orden es lineal.

## La copia y el error

En principio, el número de secuencias nucleicas posibles y, por ende, el de arquitecturas proteicas es prácticamente ilimitado. Todavía no se conocen bien las restricciones estructurales que pueden imponer ciertas ligaduras físicas. Aun así, lo posible excede con mucho todo lo realizado. La pequeña célula bacteriana contiene sólo unos cuantos miles de especies proteicas, pero cada una de ellas se encuentra perfectamente adapta-

da a su función; cada una aporta, con precisión y rendimiento admirables, su contribución al proyecto de producir dos células a partir de una. Lo que revela hoy el análisis de la célula bacteriana es el resultado de las reproducciones que se han sucedido durante más de dos mil millones de años; es el corte que practica nuestra época en la cadena de la evolución. Esta no actúa sobre los constituyentes de la bacteria, ni tampoco sobre la bacteria entera, sino sobre grandes poblaciones. Sin embargo, la naturaleza misma de su mecanismo lleva a la evolución a ocuparse de los detalles, a poner a prueba cada una de las estructuras moleculares y adaptarlas cada vez mejor a sus funciones. Con unos seres tan simples como las bacterias, el único criterio de selección es la rapidez de multiplicación. En la carrera por dejar descendencia, el menor fallo, el menor retraso, el menor desvío, todo se paga, siempre que sea hereditario. Es una ley sin tregua ni piedad. Por mínima que sea, cualquier diferencia de estructura y, por tanto, de función entraña casi inevitablemente, al repetirse en cada generación, alguna repercusión evolutiva. La aparición de una estructura capaz de fijar varios metabolitos, el establecimiento de algún circuito regulador, favorecen la reproducción del cromosoma que los determina. La selección natural elige entre los organismos existentes pero, *a posteriori*, todo ocurre como si escogiera una a una las especies químicas que constituyen la bacteria, como si cincelara cada molécula, esmerándose en cada detalle.

En el programa genético se inscribe el resultado de todas las reproducciones pasadas; la acumulación de las exitosas, puesto que las fracasadas no han dejado rastro. El mensaje genético, el programa de la organización actual, aparece como un texto sin autor que un corrector hubiera revisado durante más de mil millones de años, mejorándolo, puliéndolo y completándolo continuamente, eliminando poco a poco cualquier imperfección. Lo que hoy se copia y se transmite para asegurar la estabilidad de la especie es este texto retocado sin cesar por el tiempo. Aquí el tiempo es el número de copias sucesivas del mensaje, el número de generaciones que, a partir de un ancestro lejano, han conducido a la célula bacteriana. Puede que nunca lleguemos a conocer en detalle los caminos seguidos por la evolución. No existe ninguna posibilidad de identificar cada una de las etapas por las que los átomos se han ido ordenando poco a poco hasta constituir, al cabo de miles de millones de generaciones, el

edificio formidable de la célula bacteriana que conocemos. Tenemos la certeza de que algunos de los mecanismos revelados por el análisis de la genética y de la biología molecular están implicados en la variación de los seres vivos y en su evolución. Sin embargo, resulta difícil precisar su papel y valorar su importancia.

Lo más llamativo de las operaciones de la célula bacteriana quizá sea su asombrosa fidelidad. Millares de reacciones se desarrollan con una precisión y una seguridad muy por encima de los logros de la tecnología y la industria humanas. La célula dispone incluso de mecanismos que se encargan de detectar las malformaciones y corregirlas. Esta precisión es la base sobre la que se sustenta el mantenimiento del sistema y su constancia a través de las generaciones, la que preserva al organismo de la descomposición que acecha indefectiblemente a todo sistema mecánico. Las anomalías lo bastante serias para causar la muerte de la célula o, mejor, su incapacidad para reproducirse no afectan a más de una bacteria entre mil durante el crecimiento. Sin embargo, seguridad no significa infalibilidad. Siempre se deslizan algunos errores. Podemos distinguir dos grupos, según se transmitan o no a la descendencia, que alteren las instrucciones genéticas o impidan su ejecución. Este último caso puede deberse a errores en las operaciones de transcripción y, sobre todo, de traducción que ponen en marcha una maquinaria compleja, como puede ser una errata en la colocación de una unidad proteica respecto del triplete nucleico correspondiente. Un cambio en un solo símbolo de la secuencia puede dar lugar a una proteína modificada incapaz de desempeñar su función. Pero los errores de este género son raros; de lo contrario no sería posible purificar una proteína y establecer la secuencia de sus unidades sin ambigüedad. Para la célula no representa ningún peligro que se produzcan una o dos moléculas de enzima defectuosas por cada mil que ejecutan el mismo trabajo. Se trata de simples defectos de fabricación, sin consecuencias para la especie.

Sólo los fallos que entrañan un cambio del propio mensaje genético, es decir, las mutaciones, pueden tener consecuencias para la especie, puesto que, una vez surgidas, se copian fielmente de generación en generación. Las bacterias permiten analizar las mutaciones, su origen y su expresión con una facilidad y una eficacia desconocidas en los otros organismos. Se puede ejercer una presión de selección implacable sobre

poblaciones enormes, y en la dirección deseada. De esta forma el genético puede hacer surgir los mutantes más raros. Para conseguirlo, basta situar los miles de millones de organismos que caben en una gota de cultivo en condiciones tales que únicamente el mutante esperado pueda multiplicarse. Resulta fácil entonces medir la frecuencia de las mutaciones, precisar su mecanismo y buscar una eventual relación causal entre función y estructura. La naturaleza de las mutaciones viene impuesta por la propia organización del texto químico. Hay mutación cuando se altera el sentido del texto, cuando se modifica la secuencia nucleica que codifica una secuencia proteica, es decir, una estructura que cumple una función. Las mutaciones resultan de errores semejantes a los que introduce un copista o un impresor en un texto. Un mensaje nucleico, lo mismo que un texto, puede ser modificado por el cambio de un signo, por la sustracción o adición de uno o varios signos, por la trasposición de signos de una frase a otra, por la inversión de un grupo de signos; en resumen, por cualquier evento que altere el orden preestablecido.

Estos eventos se caracterizan porque no pueden guiarse en ninguna dirección concreta, ni por el medio ni por ningún constituyente celular. Los cambios de texto químico se producen al azar, no son producto de ninguna elección previa. El empleo de ciertas radiaciones o ciertos reactivos de los que se conoce su efecto sobre radicales químicos particulares permite cambiar selectivamente una de las cuatro unidades nucleicas, transformar, por ejemplo, un B en A. Pero el signo B se repite millones de veces a lo largo de la cadena. El reactivo químico no puede escoger un B particular, sino que actúa al azar transformando uno cualquiera de ellos. La única molécula que tiene conocimiento de la secuencia nucleica para establecer su orden durante el proceso de copiado es el propio ácido nucleico. En el proceso de síntesis proteica, la transferencia de la información se efectúa siempre en sentido único, del ácido nucleico a la proteína, nunca en sentido opuesto. No existe en la naturaleza ninguna especie molecular capaz de modificar la secuencia nucleica de manera concertada, ni entre las enzimas que alinean las unidades nucleicas para copiar la matriz, ni entre las proteínas reguladoras que ponen los segmentos nucleicos en posición de «marcha» o «paro». Estas moléculas pueden establecer asociaciones con el ácido nucleico, pero no pueden modificar las secuencias del mensaje en función de un significado que ignoran.

Dada la naturaleza misma del material genético y las relaciones que mantiene con los otros constituyentes celulares, ninguna especie molecular tiene forma de cambiar el plan que decide su propia arquitectura. Es decir, un gen no puede ser transformado por referencia a la función que rige. Las mutaciones, sean espontáneas o provocadas artificialmente, modifican siempre de manera casual el orden de una secuencia al azar dentro de un programa genético. Todo el sistema está diseñado para que sus modificaciones sean a ciegas. No existe en la célula ningún constituyente para interpretar el programa en su conjunto, ni siquiera para «comprender» una secuencia y modificarla en consecuencia. Los elementos que traducen el texto genético sólo comprenden el significado de los tripletes por separado. Los que reproducen el programa, y por lo tanto podrían cambiarlo, no lo entienden. Aunque se quisiese modificar el texto, no habría ningún medio de acción directa. Habría que pasar el largo trámite de la selección natural.

Cada mutación, cada error de copia, afecta a uno o varios signos del texto genético. Cada una modifica uno o varios genes con la consiguiente alteración de una o varias proteínas. Según la «utilidad» de estas estructuras, según favorezcan o no el proyecto reproductor de la bacteria, el mutante se verá o no favorecido en relación a sus congéneres. Evidentemente, el conjunto de estructuras y funciones que vemos en un organismo situado en condiciones semejantes a su medio natural ha sido perfeccionado por la selección a lo largo de millones de generaciones. La precisión y la eficacia alcanzadas son tales que, para la mayoría, una modificación del programa sólo puede provocar una disminución o una pérdida funcional. Sólo cuando se transforma radicalmente el medio, la mutación puede aportar algún beneficio al organismo. Aunque mueran miles de millones de individuos, incapaces de multiplicarse, basta con que se reproduzcan algunos mutantes para que la especie se adapte a las nuevas condiciones. Algunas mutaciones que en circunstancias habituales son nocivas pueden ser favorables en situaciones excepcionales.

Las mutaciones representan casi siempre cambios cualitativos, no cuantitativos. Modifican el orden del texto genético, pero no añaden nada nuevo. Ahora bien, la evolución procede incrementando la complejidad del organismo y, por ende, ampliando su programa. Dos clases de eventos pueden aumentar el contenido de información genética de la célula

bacteriana. En primer lugar, puede ocurrir que durante la reproducción del cromosoma se copie dos veces un mismo segmento. Se trata de un error parecido al que puede darse en la composición de un texto cuando, por descuido, se copia dos veces una misma línea. El fragmento genético duplicado se perpetúa entonces de generación en generación. Las dos copias del mismo gen producen la misma proteína. Dado que las presiones selectivas para mantener las funciones se ejercen sobre un gen, el otro puede variar a su antojo y las mutaciones pueden surgir con toda libertad. Ya no es necesario que estas variaciones aporten alguna ventaja a la célula para que se perpetúen. Basta con que no sean nocivas. Todo indica que ha sido la ocurrencia de tales repeticiones lo que poco a poco, eslabón a eslabón, ha ido creando las cadenas de reacciones químicas.

Ciertas bacterias suplementan su programa genético de otra manera. Normalmente los microorganismos están aislados entre sí y no intercambian ninguna información. Su pared les protege de toda influencia externa. No obstante, a veces se realizan transferencias de material genético de una célula a otra, bien por medio de virus, bien por procesos que recuerdan la sexualidad de los seres superiores. Sin embargo, este material genético suplementario sólo tendrá consecuencias sobre la descendencia de la célula en la medida en que consiga implantarse en el programa genético bacteriano para ser reproducido y transmitido de una generación a otra. Esta implantación se realiza muchas veces por recombinación genética. De esta forma, un segmento de cromosoma puede ser sustituido por un segmento homólogo procedente de otro individuo. Entre las poblaciones de bacterias que se multiplican en una variedad de condiciones tienden a constituirse conjuntos de genes diferentes según las exigencias del medio. Mediante la recombinación, los genes de individuos diferentes pueden entrar a formar parte de combinaciones nuevas que a veces ofrecen ventajas reproductivas. Aunque para las bacterias que ordinariamente se reproducen por fisión la sexualidad no sea una forma de reproducción propiamente dicha, permite la recombinación de los distintos programas genéticos existentes en la especie y, por eso mismo, la aparición de tipos genéticos nuevos.

La recombinación remodela los programas genéticos de las poblaciones, pero no los suplementa. Existen, sin embargo, ciertos elementos genéticos que se transmiten de célula a célula sumándose al material

genético existente. Estos elementos constituyen en cierto modo cromosomas supernumerarios. Sus instrucciones no son indispensables ni para el crecimiento ni para la reproducción, pero este texto genético suplementario permite a la célula adquirir nuevas estructuras y efectuar nuevas funciones. Un elemento de esta clase determina, por ejemplo, la diferenciación sexual en ciertas especies bacterianas. Por otra parte, la secuencia nucleica contenida en dichos elementos supernumerarios, al no ser indispensable, no está sometida a las ligaduras que la selección natural impone sobre la estabilidad del cromosoma bacteriano. Para la célula estos elementos constituyen un suplemento gratuito, una suerte de reserva de texto nucleico con plena libertad para variar en el transcurso de las generaciones.

La estabilidad y la variabilidad de los seres vivos, dos propiedades aparentemente opuestas, se asientan en la naturaleza misma del texto genético. Si se considera la célula bacteriana individual, vemos copiarse con un rigor extremo, letra por letra, el programa donde se consignan no sólo los planos detallados de cada arquitectura molecular, sino también los procedimientos de ejecución y coordinación de la actividad de las estructuras. Si, por el contrario, se consideran las poblaciones de bacterias, o el conjunto de una especie, el texto nucleico aparece entonces perpetuamente desorganizado por los errores de copia, las recombinaciones, las adiciones y las omisiones. A fin de cuentas, el texto siempre se está reordenando. No por una voluntad misteriosa que busca imponer sus designios, ni por la influencia directora del medio: el mensaje nucleico no aprende de la experiencia. La reordenación del mensaje se sigue automáticamente de una selección ejercida, no sobre el texto genético, sino sobre los organismos enteros o, más bien, sobre las poblaciones, para eliminar toda irregularidad. La idea de selección está contenida en la naturaleza misma de los seres vivos, en el hecho de que existen sólo en la medida en que se reproducen. Cada individuo que, en virtud del juego de la mutación, la recombinación y la adición, es portador de un nuevo programa, debe pasar la prueba de la reproducción. Si el nuevo organismo no puede reproducirse, entonces desaparece. Si es capaz de reproducirse mejor y más rápidamente que sus congéneres, esta ventaja, por mínima que sea, favorece en seguida su multiplicación y, por lo tanto, la propagación de su programa genético. El texto nucleico, por lo tanto, sí

es modelado en definitiva por el medio, las lecciones de la experiencia pasada acaban quedando grabadas en él, pero por vía indirecta, en virtud del puro y simple proceso reproductivo. Sólo se reproduce lo que existe. La selección elige no entre lo posible, sino entre lo existente.

Contrariamente a la estructura del texto genético, la ejecución de las instrucciones contenidas en él está sometida a influencias específicas del medio. Sin embargo, tampoco aquí el medio ejerce ninguna influencia didáctica. En algunos procesos, como la síntesis inducida de enzimas, la célula bacteriana responde a la presencia de compuestos específicos en el medio con la producción de proteínas específicas. No hace aún muchos años parecía inevitable que el compuesto tuviera que modular de alguna manera el sentido de la frase genética, darle su parte de orden, aportar su contribución a la estructura final de la proteína. Hoy sabemos que no ocurre así: incluso en estos fenómenos el medio no ejerce ningún efecto didáctico. El compuesto específico ejerce el papel de un simple estímulo; se limita a poner en juego una síntesis en la que los mecanismos y la estructura del producto final están fijados rígidamente por el texto nucleico. El sistema sólo permite una elección entre dos alternativas. La única instrucción que puede recibirse del medio, con la mediación de las proteínas reguladoras, es una señal de puesta en marcha o paro. La lectura del mensaje genético recuerda la música de las máquinas de discos en los cafés. Apretando un botón se puede elegir entre los discos de la máquina el que se desea escuchar, pero en ningún caso se puede modificar el registro o la ejecución de la música grabada. Igualmente, un segmento del texto genético contenido en el cromosoma bacteriano puede transcribirse o no, según las señales químicas que reciba del medio, pero éstas no pueden modificar la secuencia, es decir, su función. La vieja palabra «adaptación» tiene, pues, dos sentidos distintos. Por un lado, se refiere a un fenómeno individual que traduce de alguna forma la respuesta del organismo ante algún factor externo, pero siempre dentro de los límites permitidos por las instrucciones contenidas en el programa. Por otro lado, se refiere a las modificaciones surgidas en una población, en cuyo caso es el propio programa el que cambia bajo el efecto de una presión que favorece determinados programas a medida que aparecen. Pero, tanto si se trata de explotar las posibilidades de un programa como de cambiar-

las, la adaptación es siempre resultado de una acción del medio, no didáctica, sino selectiva.

Así es como se representa la biología molecular el umbral de integración que separa el mundo vivo del mundo inanimado. Es cierto que aún estamos lejos de conocer todos los detalles de un objeto tan simple como una bacteria. De las dos mil reacciones que se efectúan en la pequeña fábrica química, solamente se han identificado y estudiado seiscientas o setecientas. Aún ignoramos la composición y la estructura de muchas especies químicas que se reconocen y se ensamblan en orgánulos. Todavía no conocemos plenamente la composición y la estructura de la membrana. Pero si cada nueva adquisición nos hace ver la complejidad de los detalles, también nos muestra la simplicidad de los principios puestos en juego. Los procedimientos que emplea la naturaleza se parecen mucho a los que emplea la tecnología humana, ya sea la prolongación de polímeros, las transferencias de información o los circuitos de regulación. A medida que se estudia la fábrica bacteriana, se desmontan sus mecanismos y se analizan sus estructuras, no vemos aparecer nada, al menos en teoría, que esté más allá del alcance de nuestra química experimental. No hay solución de continuidad entre el comportamiento de las pequeñas moléculas minerales y el de las enormes arquitecturas orgánicas, entre las reacciones de lo no viviente y las de lo viviente, entre la química del laboratorio y la de los organismos. La actividad de las enzimas se manifiesta en un tubo de ensayo y se ejerce sobre moléculas que muchas veces pueden prepararse en el laboratorio poniendo sólo en juego interacciones conocidas por los físicos. Recientemente se ha sintetizado una enzima que posee la misma actividad catalítica que su homóloga natural. En teoría, esta operación no presenta ninguna dificultad: hace tiempo que se sabe cómo enlazar en el laboratorio las unidades de una cadena proteica. Pero, en la práctica, esta síntesis representa una tarea extremadamente compleja: se trata de alinear y luego enlazar una a una varios centenares de unidades. Esto se realiza por adiciones sucesivas, y cada una de estas operaciones pone en marcha una serie de reacciones químicas. La formación de la proteína implica, por lo tanto, millares de reacciones ejecutadas una tras otra en un orden riguroso. A pesar de la construcción de máquinas capaces de efectuar automáticamente parte de la tarea en un orden prescrito por un programa, una tal síntesis sigue resultando difícil,

considerablemente lenta y de rendimiento mínimo. Sin embargo, no es arriesgado predecir la pronta producción de una variedad de proteínas; no sólo de moléculas dotadas de alguna actividad catalítica, sino también de estructuras sin función conocida; algo parecido a lo que existía en la Tierra antes de la aparición de los seres vivos. Estas estructuras sin función ni finalidad permitirían explorar un pasado difícilmente accesible a la experimentación.

Por razones no de principio, sino técnicas, la producción en el laboratorio de una larga cadena nucleica con una secuencia precisa aún tiene que vencer muchas dificultades. No es que el químico ignore la manera de ligar una a una las unidades nucleicas, sino que la eficiencia de los procedimientos conocidos es todavía muy baja. Aunque el rendimiento de cada reacción sobrepasara el noventa por ciento, y estamos lejos de ello, después de las miles de operaciones necesarias la cantidad de producto formado sería irrisoria en relación con las materias primas consumidas. Sin embargo, se pueden sintetizar secuencias cortas y luego convertirlas en cadenas repetitivas largas. Combinando los procedimientos de la química orgánica con la utilización de enzimas bacterianas se ha logrado ya la síntesis de un gen. Todo indica que llegarán a producirse secuencias nucleicas susceptibles de implantarse en la célula y conferirle alguna función nueva. Lo que parece fuera de nuestro alcance por el momento es la creación, pieza por pieza, de una cadena nucleica larga y la elaboración sintética de un programa genético incluso tan simple como el de un virus. Pero no existe ninguna razón a priori para que no pueda conseguirse algún día.

Lo que atrajo a muchos físicos hacia la biología y, sobre todo, al análisis de la herencia fue la esperanza de encontrar en ella alguna ley nueva aún no revelada por el estudio de la materia. Esta esperanza se ha visto frustrada. La ineficiencia de las técnicas hace inaccesible a la química experimental la complejidad de muchas estructuras. No es inconcebible que en el futuro se consiga sintetizar una a una las miles de especies químicas que constituyen la célula bacteriana; pero no hay ninguna posibilidad de ver surgir una bacteria completamente formada ensamblando correctamente todos esos compuestos en un tubo de ensayo. Muchas de las enzimas polimerizadoras sólo funcionan en presencia de una matriz. Otras sólo pueden agrandar un fragmento de polímero preexistente, que

se utiliza como cebo. También es posible que la orientación correcta de las unidades que se ensamblan para formar ciertos orgánulos complejos esté determinada a veces por la presencia de orgánulos ya formados. La información sobre la estructura de los constituyentes individuales está contenida en las secuencias nucleicas. Sin embargo, aunque la mayoría de macromoléculas se ensambla espontáneamente, no se puede afirmar que esto baste siempre. No puede excluirse que la conformación de ciertos complejos esté dirigida por la conformación ya presente, como sucede en la formación de los cristales. Por rudimentaria que parezca la célula bacteriana en comparación con otras formas de vida, ha tenido que pasar mucho tiempo para que el sistema se organizara. El virtuosismo metabólico de la bacteria se debe a que durante dos mil millones de años sus antepasados han practicado esta química anotando escrupulosamente la receta de cada resultado. Aquí se produce el corte entre el mundo vivo y el mundo inanimado, entre la biología y la física. Los cuerpos inanimados no dependen del tiempo. Los cuerpos vivos están indisolublemente ligados a él. En ellos, ninguna estructura puede desligarse de la historia.

La historia de nuestro colibacilo no es más que una cadena continua de reproducciones con sus aventuras, sus callejones sin salida y sus logros. Si hoy en día existen bacterias en este planeta es porque, a lo largo del tiempo, otras bacterias o seres aún más rudimentarios buscaron desesperadamente reproducirse sin cesar. Al no ser infalible el mecanismo de copia, surgen numerosas ocasiones de cambio, sea para deteriorar el sistema o para perfeccionarlo. La evolución se funda en incidentes, eventos raros, errores. Lo que conduciría a un sistema inerte hacia su destrucción se convierte en fuente de novedad y complejidad en un sistema vivo. El accidente puede transformarse en innovación y el error en éxito, puesto que el juego de la selección natural tiene sus propias reglas. Las únicas desviaciones que cuentan son las que repercuten en la magnitud de la descendencia. Si la reducen es un fracaso, si la aumentan, un éxito. En este juego no hay ni táctica ni estrategia, sólo cuentas que se saldan con la desaparición o la expansión. La reproducción orienta el azar.

A diferencia de los organismos cuya reproducción es obligatoriamente sexuada, en las bacterias el nacimiento no se compensa con la muerte. Durante el crecimiento de los cultivos las bacterias no mueren. Desaparecen en tanto que entidad: donde había una, de pronto hay dos. Las

moléculas de la «madre» se reparten equitativamente entre las «hijas». La madre contenía, por ejemplo, una larga fibra de ácido desoxirribonucleico que se duplica antes de la división celular; cada hija recibe una de estas fibras idénticas, formadas cada una por una cadena «vieja» y una nueva. Uno de los criterios que permiten decidir si una bacteria está viva o no es su incapacidad de reproducirse. Esta no-vida puede contemplarse como una muerte, pero se trata de una muerte contingente. Muchas veces depende del medio y de las condiciones de cultivo. Si se renueva continuamente el medio de cultivo, las bacterias se reproducen en él perpetuamente.

Lo que hace efímera la vida individual en un cultivo de bacterias no es la muerte en el sentido habitual, sino la disolución que entraña el crecimiento y la multiplicación. Sólo persiste la organización que se reproduce automáticamente mientras la célula puede extraer energía y materiales del medio. Ningún alma orienta las operaciones ni ninguna voluntad les ordena continuar o pararse. Solamente existe la perpetua ejecución de un programa indisociable de su realización, puesto que los únicos elementos que interpretan el mensaje genético son los productos del mensaje. El texto genético sólo tiene sentido en las estructuras que él mismo determina. Ya no existe, pues, una causa de la reproducción, sino sólo un ciclo de eventos en el que cada uno de los constituyentes opera en función de los otros. Si la organización pudo reproducirse, si aparecieron los seres vivos, es porque la complejidad espacial de las arquitecturas fue engendrada por la simplicidad de una combinatoria lineal, y porque pudo establecerse una relación unívoca entre dos sistemas de símbolos: uno que permite conservar la información a lo largo de las generaciones, y otro para el despliegue de las estructuras en cada generación. El primero determina una comunicación vertical de padre a hijo; el segundo una comunicación horizontal entre los constituyentes del organismo. La relación entre ambos sistemas confiere a la reproducción celular una lógica interna que no es producto de inteligencia alguna, una lógica que excluye la posibilidad de que el medio o la propia célula puedan modificar el mensaje genético. Sólo la actividad del material genético, y no su estructura, está sometida a la regulación que coordina los constituyentes del organismo. Lo cual no significa en absoluto que el mensaje nucleico escape a toda influencia. Fuera del control interno de la célula, el pro-

grama genético queda sometido a una regulación externa; no porque una mano misteriosa conduzca el destino de la bacteria, sino porque una bacteria individual forma parte de una población, la que vive en el tubo de ensayo, en un charco de agua o en el intestino de un mamífero. El individuo representa entonces un simple elemento en un sistema de nivel superior que funciona con otra lógica. En el interior de este sistema se ejerce una regulación sobre el programa genético. Las interacciones entre la población y su medio acaban repercutiendo en la reproducción de novedades que acontecen espontáneamente en el texto genético. Entre el programa genético y el medio existe la necesaria relación que exige la adaptación, pero ésta se establece sólo a través del rodeo de un largo bucle retroactivo que mide la calidad del mensaje por la cantidad de la descendencia. Si el texto genético se encuentra en perpetua transformación, si no deja de modificarse, corregirse y adaptarse a la reproducción en las condiciones más variadas, es por los retoques sucesivos que aporta la selección natural. Sin ningún pensamiento que lo dicte, sin imaginación que lo renueve, el programa genético se transforma al realizarse.

# Conclusión: El integrón

El hecho de que la herencia pueda interpretarse actualmente en términos de moléculas no es ni un punto final ni la prueba de que a partir de ahora toda la biología va a ser molecular. Lo que significa ante todo es que las dos grandes corrientes de la biología, la historia natural y la fisiología, que durante mucho tiempo han estado distanciadas, casi ignorándose mutuamente, han acabado finalmente fusionándose. La vieja discusión entre integristas y atomistas quedó zanjada por la distinción establecida no ha mucho por la física entre lo microscópico y lo macroscópico. Por un lado, la variedad del mundo vivo, la extraordinaria diversidad de formas, estructuras y propiedades observadas en el nivel macroscópico, se basan en la combinatoria de unas pocas especies moleculares, es decir, en una extrema simplicidad de medios al nivel microscópico. Por otro lado, los procesos que se desarrollan en los seres vivos al nivel molecular no se distinguen en nada de los considerados por la física y la química de los sistemas inertes; sólo al nivel macroscópico aparecen en los organismos propiedades particulares nacidas de las ligaduras impuestas por la necesidad de reproducirse y de adaptarse a ciertas condiciones. Se trata, pues, de interpretar los procesos comunes a los seres y a las cosas en función del estatuto particular que confieren a los seres su origen y su fin.

El reconocimiento de la unidad de los procesos fisicoquímicos al nivel molecular significa que el vitalismo ya no tiene objeto alguno. De hecho, desde el nacimiento de la termodinámica, el valor operativo del concepto «vida» ha ido disminuyendo y su poder de abstracción declinando. Actualmente ya no se interroga a la vida en los laboratorios, ya no se busca delimitar su ámbito, sino sólo analizar los sistemas vivos, sus estructuras, sus formas y su historia. Pero, al mismo tiempo, reconocer la finalidad de los sistemas vivientes supone admitir que no se puede hacer biología sin una referencia constante al «proyecto» de los organismos, al «sentido» que da a sus estructuras y funciones su propia existencia. Puede verse cuán distinta es esta actitud de la del reduccionismo que ha prevalecido durante tanto tiempo. Hasta ahora, para que el análisis fuera

científico, en primer lugar tenía que abstraerse de toda consideración que se saliese del sistema estudiado y de su papel funcional. El rigor impuesto a la descripción exigía la eliminación del elemento finalista que el biólogo se negaba a admitir en su análisis. Hoy día, por el contrario, ya no podemos disociar la estructura de su significación, no solamente en el organismo, sino en toda la serie de acontecimientos que han conducido al organismo a ser lo que es. Todo sistema vivo es el resultado de un cierto equilibrio entre elementos de una organización. La solidaridad de estos elementos hace que cada modificación introducida en un punto comprometa el conjunto de relaciones y produzca tarde o temprano una organización nueva. Aislando sistemas de naturaleza y complejidad diferentes se intenta reconocer los constituyentes y justificar las relaciones. Pero sea cual fuere el nivel estudiado, sean moléculas, células, organismos o poblaciones, la perspectiva histórica aparece como necesaria y la sucesión como principio explicativo. Cada sistema vivo se proyecta en dos planos de análisis, uno horizontal y otro vertical, que sólo pueden disociarse para facilitar la exposición. Por un lado, se trata de distinguir los principios que rigen la integración de los organismos, su construcción y su funcionamiento; por otro, los principios que han dirigido sus transformaciones y su sucesión. Describir un sistema vivo supone hacer referencia tanto a la lógica de su organización como a la de su evolución. La biología se interesa hoy por los algoritmos del mundo viviente.

La organización de los sistemas vivos obedece a una serie de principios, tanto físicos como biológicos: selección natural, energía mínima, autorregulación, construcción «escalonada», por integraciones sucesivas de subconjuntos. La selección natural impone una finalidad no sólo al organismo entero, sino a cada uno de sus constituyentes. En un ser vivo, toda estructura ha sido seleccionada porque cumplía cierta función en un conjunto dinámico capaz de reproducirse. Las moléculas que componen los sistemas vivos se distinguen por su historia y por su continuidad. Algunas no han variado desde hace millones de años; en cierto sentido continúan siendo copias de las que se formaron antaño. Otras, por el contrario, se han transformado bajo alguna presión selectiva. Muchas se han perdido por el camino. Otras han surgido junto con especies nuevas. Pero detrás de las exigencias de la selección, los sistemas vivos, igual que los inertes, continúan sometidos al principio de energía mínima. Las

reacciones de lo viviente, impliquen o no enlaces químicos verdaderos, entrañen síntesis o bien simples asociaciones moleculares, se encaminan siempre hacia una misma meta, la disminución de la energía libre. Sus velocidades están siempre determinadas por las energías de activación que exigen las transiciones en juego.

Los circuitos reguladores dan a los sistemas vivos su unidad y les permiten ajustarse a las reglas de la termodinámica. Para ésta, una reacción química sólo puede modularse a través de su equilibrio o de su velocidad. En una reacción simple la constante de equilibrio es una función de las moléculas que participan en ella. La catálisis incrementa la velocidad de reacción disminuyendo la energía de activación necesaria. En una reacción en la que interviene una arquitectura tan compleja como una proteína, como es el caso de una reacción enzimática, la conformación de la proteína determina tanto su afinidad con el sustrato como la velocidad de la reacción; éstas sólo pueden cambiarse modificando aquélla. Toda la coordinación celular se fundamenta en la deformación geométrica de algunas proteínas por efecto de interacciones con ciertos metabolitos que actúan como señales específicas. En los seres pluricelulares hay circuitos reguladores añadidos que se encargan de concertar e integrar las actividades celulares. Aquí intervienen los contactos directos entre células, las hormonas y el sistema nervioso. Todavía se sabe poco del funcionamiento de estos circuitos. Sin embargo, es verosímil que las hormonas y mediadores químicos del sistema actúen también deformando ciertas proteínas membranales de las células sensibles. Estos compuestos no tienen ningún significado propio. Sólo adquieren el valor de señal para ciertas células gracias a la presencia de proteínas receptoras, en definitiva, gracias al programa genético de dichas células. En cualquier caso, la regulación de estos sistemas biológicos opera sobre los equilibrios y las velocidades de reacción. Los procesos de regulación traducen siempre la interacción de los constituyentes o, lo que es lo mismo, de las propiedades inherentes a su conformación y, por ende, a su estructura.

En cuanto a la arquitectura escalonada, es el principio que rige la construcción de cualquier sistema viviente, sea cual fuere su grado de organización. La complejidad de un organismo es tal que incluso el más simple de ellos seguramente no hubiese podido nunca formarse, reproducirse ni evolucionar si el conjunto hubiese tenido que organizarse pieza

por pieza, molécula por molécula como un mosaico. En vez de eso, los organismos se construyen por una serie de integraciones. Elementos similares se ensamblan en un conjunto intermediario. Varios de estos conjuntos se asocian para construir un conjunto de nivel superior, y así sucesivamente. La complejidad de los seres vivos nace de la combinación de elementos cada vez más elaborados, y de la articulación de estructuras subordinadas unas a otras. Si estos sistemas pueden reproducirse a partir de sus elementos en cada generación, esto significa que la estructura intermedia en cada nivel es termodinámicamente estable. Así, los seres vivos se construyen mediante una serie de empaquetamientos, según una jerarquía de conjuntos discontinuos. En cada nivel, unidades de tamaño relativamente bien definido y estructura casi idéntica se unen para formar la unidad del escalón siguiente. Cada una de estas unidades, producto de la integración de subunidades, puede designarse con el término general de *integrón*. Un integrón se forma por la unión de integrones de nivel inferior, y a su vez participa en la construcción de un integrón de nivel superior.

Esta jerarquía de integrones, este principio de la caja hecha de cajas, queda ilustrada en el nivel microscópico por la elaboración de las estructuras proteicas en el seno de la célula. En la construcción de estas estructuras pueden distinguirse tres etapas. En la primera, a partir de elementos inorgánicos y mediante una serie de reacciones enzimáticas, se producen moléculas pequeñas específicas, las subunidades proteicas. La especificidad de las reacciones se sustenta en la asociación entre enzimas y sustratos y en su equilibrio. Su velocidad se coordina por la interacción de las enzimas con ciertos metabolitos. En una segunda etapa, los polímeros se ensamblan a lo largo de matrices sobre las cuales se alinean las subunidades en un orden preciso. Esta ordenación se apoya en asociaciones específicas, sin intervención de enlace químico alguno. Una vez emplazadas las subunidades, éstas se encadenan por la acción de enzimas. En una tercera y última etapa, las cadenas proteicas se repliegan y se ensamblan en superestructuras. En las más simples la unión es resultado únicamente de las propiedades de asociación derivadas de la propia estructura de los constituyentes: la afinidad mutua de los elementos es suficiente para el ordenamiento espontáneo del sistema. En las más complejas es posible que intervengan «centros» de organización que pueden funcionar,

bien como agentes estructuradores que modifican la conformación de otros constituyentes, bien como enzimas que aceleran su asociación, bien como matrices que favorecen una disposición particular entre las autorizadas por la termodinámica. De todas maneras, las configuraciones posibles de una estructura organizada dependen de las energías de enlace entre los elementos. Constituyen una propiedad de equilibrio del sistema. Aunque existan tales centros, su formación sigue estando determinada por las interacciones entre los constituyentes. Al fin y al cabo, las estructuras más complejas se construyen por una serie de etapas en las que los intermediarios pueden servir no sólo como materiales, sino, llegado el caso, como agentes para la edificación de la estructura siguiente. Hasta nueva orden, lo único que se requiere para la construcción de una estructura son los elementos incorporados en ella. Los seres vivos se forman por la unión espontánea de los constituyentes.

En muchos aspectos, las propiedades de las estructuras biológicas recuerdan las de los cristales. Ésta es una vieja analogía ya entrevista hace más de dos siglos, cuando se propuso para explicar la forma, el crecimiento y la reproducción de los seres organizados. Pero fue abandonada cuando se desveló la estructura de un sólido cristalino perfecto. Un cristal perfecto hace intervenir la repetición de un mismo patrón en las tres dimensiones. Consiste en un ordenamiento regular de átomos del centro a la superficie. Inaccesible, el interior de la estructura queda excluido de toda función. El cristal sólo puede crecer por la adición de elementos en superficie. No se reproduce. Pero el concepto de cristal ha sido generalizado y ahora se aplica también a toda organización material que se repite en dos dimensiones o incluso una sola. A partir de partículas que, por así decirlo, no tienen dimensión, pueden constituirse espontáneamente fibras y superficies parecidas a las membranas de los cuerpos tridimensionales. Así pues, la analogía entre cristales y estructuras biológicas vuelve a tener valor operativo. Lo que confiere a los objetos de un conjunto la propiedad de ensamblarse es su identidad. Esta no sólo les permite formar estructuras geométricas, sino que les faculta para formarlas espontáneamente. Pero no hay modo de evaluar el rigor que encierra la palabra identidad, es decir, la variación estructural tolerable. Si bien la formación de cristales tridimensionales parece estar sujeta a límites estrictos, éstos no parecen ser tan severos en los otros casos. Así, las subunidades nu-

cleicas o proteicas representan objetos lo bastante idénticos para disponerse en ordenaciones geométricas. Toda una serie de estructuras biológicas, los polímeros, las membranas, los orgánulos celulares, tienen, por lo tanto, su lógica interna. Una lógica que, sin ser exactamente la de Los cristales tridimensionales, no difiere mucho de ella. Sean cuales fueren las estructuras consideradas, sólo pueden ejercer alguna función química por su superficie.

En la actualidad se perciben con cierta claridad los principios que intervienen en la organización y la construcción de los sistemas vivos, así como su lógica y, por extrapolación, su origen. Sin embargo, todavía se aprecia mal la sucesión de eventos que condujo de la materia orgánica a lo viviente. Para el biólogo, lo viviente empieza con la constitución de un programa genético. Según él, un organismo sólo merece tal nombre a partir del momento en que es objeto de selección natural. La marca de lo viviente es la facultad de reproducirse, por muchos años que pudiera necesitar un ser primitivo para formar un semejante. Para el químico, en cambio, es arbitrario trazar una demarcación allí donde sólo podía haber continuidad. Todo organismo contiene una panoplia de estructuras, funciones, enzimas, membranas, ciclos metabólicos, compuestos ricos en energía, etc. Sea cual fuere el origen que se quiera asignar a lo que llamamos sistema vivo, su organización no puede concebirse fuera de un medio ya dispuesto desde mucho antes. La evolución biológica es la continuación necesaria e ininterrumpida de una larga evolución química. En el laboratorio pueden reconstruirse las condiciones que, se supone, prevalecían en la Tierra antes de la aparición de los seres vivos. Cuando se hace esto, vemos formarse espontáneamente toda una serie de compuestos orgánicos; aparecen incluso polímeros por los enlaces aleatorios establecidos entre subunidades. A pesar de su ineficiencia, parece ser que las reacciones necesarias para la elaboración de las macromoléculas características de lo viviente se efectúan en ausencia de catalizadores biológicos. Lo que es difícil de imaginar, sin embargo, es la aparición de un sistema integrado, por primitivo que sea, el origen de una organización capaz de reproducirse, aunque sea de manera imperfecta o lenta, puesto que el más humilde de los organismos, la más modesta de las bacterias, constituye ya una colectividad de gran número de moléculas. Es impensable que todas las piezas se formaran independientemente en el

océano primitivo para luego, un buen día, encontrarse por puro azar y organizarse de pronto en un sistema integrado. El ancestro sólo podía ser una especie de núcleo, una asociación de unas cuantas moléculas ayudándose las unas a las otras a reconstituirse con más o menos fortuna. Pero entonces, ¿cómo empezó todo? El mensaje genético sólo puede ser traducido por los productos mismos de su propia traducción. Sin ácidos nucleicos, las proteínas no tienen continuidad. Sin proteínas, los ácidos nucleicos permanecen inertes. ¿Cuál es el huevo y cuál la gallina? ¿Dónde buscar las huellas de un tal precursor, o de un precursor del precursor? ¿En algún rincón todavía no explorado de la Tierra? ¿Sobre un meteorito? ¿Sobre otro planeta del sistema solar? No cabe duda de que el descubrimiento, sino de una nueva forma de vida, al menos de vestigios orgánicos de cierta complejidad no tendría precio. Ello transformaría nuestra consideración del origen de los programas genéticos. Pero esta esperanza se debilita con el tiempo.

A falta de vestigios que interrogar, la biología sólo puede hacer conjeturas. Intenta clasificar los problemas, identificar los objetos, formular preguntas que puedan responderse mediante la experimentación. ¿Qué clase de polímeros, nucleicos o proteicos, es anterior? ¿Cuál es el origen del código genético? El primer interrogante lleva a preguntarse si, en ausencia de una u otra clase de polímeros, no sería concebible algo que poseyera un vago parecido con lo viviente. La segunda pregunta plantea problemas evolutivos y lógicos. Evolutivos porque la correspondencia unívoca entre cada grupo de tres subunidades nucleicas y cada subunidad proteica no pudo aparecer de golpe; lógicos porque no está claro por qué razón se adoptó esta correspondencia particular y no otra, por qué tal triplete nucleico «significa» tal subunidad nucleica y no otra. Quizá las organizaciones primitivas estuvieran sometidas a restricciones estructurales que se nos escapan; de ser así, la adecuación de las conformaciones moleculares habría impuesto, si no el sistema entero, sí al menos ciertas correspondencias. Pero también podría ser que no hubiera restricciones de ninguna clase; en ese caso las correspondencias habrían surgido por azar y luego se habrían perpetuado. Una vez establecido un sistema de relaciones, éstas no pueden modificarse sin desposeer de significado lo que ya tenía un sentido, sin embrollar lo que ya tenía la categoría de mensaje. El código genético es como una lengua: aunque las relaciones

entre «significante» y «significado» sean producto del azar, una vez establecidas no pueden cambiarse. Éstas son las cuestiones a las que la biología molecular intenta dar respuesta. Sin embargo, nada indica que se llegue a analizar alguna vez el paso de lo orgánico a lo viviente. Quizá ni siquiera se pueda estimar la probabilidad de que apareciera un sistema viviente sobre este planeta. Si el código genético es universal, es verosímil que todo lo que ha logrado llegar hasta nosotros proceda de un único ancestro. Ahora bien, no es posible estimar la probabilidad de un acontecimiento que sólo se ha producido una vez. Es de temer que el tema se hunda en un confuso laberinto de hipótesis sin posibilidad de verificación. A propósito del origen de la vida bien podría surgir un nuevo foco de debates abstractos, con distintas escuelas y teorías edificadas sobre la metafísica y no sobre la predicción científica.

Sin embargo, lo que la biología ha demostrado es que detrás de la palabra «vida» no se esconde ninguna entidad metafísica. El poder de ensamblarse, de producir estructuras de complejidad creciente y hasta de reproducirse es inherente a los elementos que componen la materia. De las partículas al hombre, encontramos toda una serie de integraciones, de niveles, de discontinuidades. Pero ninguna ruptura, ni en la composición de los objetos ni en las reacciones que se verifican en ellos. Ningún cambio de «esencia». Hasta el punto de que el análisis de las moléculas y orgánulos celulares se ha convertido en competencia de los físicos. Los detalles estructurales se precisan ahora mediante la cristalografía, la ultracentrifugación, la resonancia magnética nuclear, la fluorescencia, etcétera. Esto no significa, en absoluto, que la biología se haya convertido en un anexo de la física, que constituya, por así decirlo, una filial de la teoría de la complejidad. En cada nivel de organización aparecen novedades, tanto en las propiedades como en la lógica. Ninguna molécula es capaz de reproducirse por sí sola. Esta facultad sólo aparece con el más simple de los integrones que merece el calificativo de vivo, es decir, la célula. Pero a partir de aquí las reglas del juego cambian. Al integrón del nivel superior, la población de células, la selección natural le impone restricciones y le aporta posibilidades inéditas. Por ello, y sin dejar de obedecer los principios que rigen los sistemas inertes, los sistemas vivos se convierten en objeto de fenómenos que no tienen ningún sentido en el nivel inferior. La biología no puede ni reducirse a la física ni ignorarla.

Todo objeto de estudio de la biología representa un sistema de sistemas. Un elemento de un sistema de orden superior obedece a veces a reglas que no pueden deducirse de su propio análisis. Esto significa que cada nivel de organización debe considerarse en referencia a los niveles que se le yuxtaponen. No se puede comprender el funcionamiento de un aparato de televisión sin conocer, por un lado, el de los transistores y, por otro, la relación entre emisor y receptor. En cada nivel de integración se manifiestan algunas características nuevas. Como ya constató la física a principios de este siglo, la discontinuidad no exige sólo medios de observación diferentes, sino que modifica también la naturaleza de los fenómenos, es decir, la naturaleza de las leyes que los rigen. A menudo, el equipamiento conceptual y técnico que se aplica a un nivel no funciona ni en el superior ni en el inferior. Lo que une los diferentes niveles de la organización biológica es la lógica de la reproducción. Lo que los distingue es la lógica interna, los medios de comunicación y los circuitos de regulación propios de cada sistema.

Todo el mundo está de acuerdo en ver una dirección en la evolución. A pesar de los errores, los callejones sin salida y los tanteos, se ha recorrido un cierto camino al cabo de más de dos mil millones de años. Sin embargo, resulta difícil describir la orientación que la selección natural ha impuesto sobre el azar. Las palabras progreso, progresión o perfeccionamiento la califican mal. Evocan demasiado la regularidad, el designio y el antropomorfismo. Los criterios no están definidos. Si el criterio es la adaptación para sobrevivir, el colibacilo aparece tan bien adaptado a su medio como el hombre al suyo. Las palabras complicación o complejidad tampoco sirven de mucho. Hay complicaciones gratuitas, y otras que, por su especialización, impiden toda posibilidad de evolución ulterior. Lo más característico de la evolución quizá sea la tendencia a la flexibilidad en la ejecución de su programa genético, su «apertura», en un sentido que permite al organismo incrementar constantemente sus relaciones con el medio y ampliar así su radio de acción. En un ser simple como una bacteria el programa es de una gran rigidez de ejecución. Es «cerrado», en el sentido de que, por un lado, el organismo sólo puede recibir del medio una información muy limitada y, por otro, sólo puede reaccionar de manera estrictamente determinada. Todo lo que llega a percibir una bacteria es la presencia o ausencia de ciertos compuestos en el medio de

cultivo. Todo lo que aporta como respuesta es la producción o no de las proteínas correspondientes. Percepciones y reacciones se reducen a una alternativa entre sí o no. Los «éxitos» de la evolución conducen a aumentar correlativamente la capacidad de percibir y la de reaccionar. Para que el organismo se diferencie y gane en autonomía, para que amplíe sus intercambios con el exterior, es preciso que se desarrollen no solamente las estructuras que lo conectan con su medio, sino también las interacciones que coordinan los constituyentes del organismo. En el nivel microscópico la evolución se basa, pues, en la constitución de nuevos sistemas de comunicación, ya sea en el interior del organismo o entre organismo y medio ambiente. En el nivel microscópico esto se traduce en la modificación de los programas genéticos, tanto en calidad como en cantidad.

El tiempo y la aritmética niegan que la evolución se deba exclusivamente a una sucesión de microeventos y mutaciones sobrevenidas al azar. Para extraer de una ruleta, una tras otra, subunidad por subunidad, cada una de las cien mil cadenas proteicas que pueden componer el cuerpo de un mamífero, es necesario un tiempo muy superior a la duración atribuida al sistema solar. Solamente en los organismos muy simples la variación puede efectuarse exclusivamente por pequeñas etapas independientes. Sólo en las bacterias la velocidad de crecimiento y la magnitud de las poblaciones permiten esperar la aparición de mutaciones adaptativas. La evolución ha sido posible porque los propios sistemas genéticos han evolucionado. A medida que se complican los organismos se complica también su reproducción. Aparece toda una serie de mecanismos que, siempre al azar, contribuyen a combinar los programas y obligan al cambio. Algunos de estos mecanismos son la repartición del programa genético en varios cromosomas, la duplicación de los cromosomas, la alternancia de fases con uno o dos juegos de cromosomas durante el ciclo vital, la segregación independiente de los cromosomas, la recombinación por ruptura y reunión de cromosomas homólogos, etc. Pero las dos invenciones más importantes son, sin duda, el sexo y la muerte.

Parece ser que la sexualidad surgió pronto en la evolución. De entrada representa una especie de auxiliar de la reproducción, algo superfluo: nada obliga a una bacteria a ejercer la sexualidad para multiplicarse.

Es la necesidad de recurrir al sexo para reproducirse lo que transforma radicalmente el sistema genético y las posibilidades de variación. Desde el momento en que la sexualidad se hace obligatoria, cada programa genético está formado no ya por la copia exacta de un único programa, sino por la combinación de dos programas diferentes. El programa genético deja de ser patrimonio exclusivo de un linaje para pertenecer a la colectividad, al conjunto de individuos que intercambian información mediante el sexo. Se constituye así una suerte de fondo genético común del que, en cada generación, se extrae el material para construir nuevos programas. Es este fondo común, esta población unida por la sexualidad, el que se constituye en unidad de evolución. A la identidad que impone la reproducción estricta del programa, la sexualidad opone la diversidad que aporta la recombinación de los programas en cada generación; una diversidad tan grande que, a excepción de los gemelos verdaderos, ningún individuo es exactamente idéntico a otro. La sexualidad obliga a los programas genéticos a recorrer las posibilidades de la combinatoria genética, y por lo tanto obliga al cambio. Basta considerar las sutilezas, los ritos y las complicaciones que acompañan la práctica del sexo en los organismos superiores para convencerse de su papel en la evolución, de que él mismo es objeto de evolución y se perfecciona constantemente.

La otra condición necesaria para la posibilidad misma de la evolución es la muerte. No la muerte venida desde fuera, como consecuencia de algún accidente, sino la muerte impuesta desde dentro, prescrita por el propio programa genético. La evolución es el resultado de una lucha entre lo que ha sido y lo que será, entre conservadurismo y revolución, entre la identidad de la reproducción y la novedad de la variación. En los organismos que se reproducen por fisión, la dilución del individuo como consecuencia de la rapidez del crecimiento es suficiente para borrar el pasado. En los organismos pluricelulares con reproducción sexual, con su diferenciación en linajes somáticos y germinales, la desaparición de los individuos es obligatoria. Esta desaparición es la resultante de dos fuerzas contrarias. Un equilibrio entre, por un lado, la eficacia sexual con su cortejo de gestaciones, de cuidados, de educación, y, por otro, la desaparición de la generación que ha cumplido con su papel en la reproducción. El ajuste de estos dos parámetros bajo el efecto de la selección natural

determina la longevidad de los miembros de una especie. Todo el proceso de la evolución, al menos en los animales, descansa sobre este equilibrio. Los límites de la vida no pueden dejarse al azar. Están prescritos por el programa que, desde la fecundación del óvulo, fija el destino genético del individuo. Se ignora todavía el mecanismo del envejecimiento. La teoría más aceptada en la actualidad define la senectud como el resultado de errores acumulados ya en los programas genéticos contenidos en las células somáticas ya en la expresión de dichos programas, es decir, en las proteínas producidas por las células. Según este esquema, la célula podría admitir un cierto número de errores. Pasado este límite, está destinada a morir. Con el tiempo, la acumulación de errores en un número creciente de células entrañaría la muerte inevitable del organismo. Así pues, la ejecución misma del programa determinaría la duración de la vida. Sea como fuere, la muerte es parte integrante del sistema seleccionado en el mundo animal y su evolución. Se pueden esperar muchas cosas de lo que hoy se llama el «genio biológico»: la solución de males como el cáncer, las enfermedades cardiacas, las enfermedades mentales; la sustitución de distintos órganos por trasplante o prótesis; el remedio de ciertos achaques de la vejez; la corrección de ciertos defectos genéticos; incluso la interrupción provisional de una vida activa que podría reanudarse a voluntad más adelante. Pero existen muy pocas probabilidades de que se pueda prolongar la vida más allá de cierto límite. Las ligaduras de la evolución concuerdan mal con el viejo sueño de la inmortalidad.

El arsenal de la genética se surte, sobre todo, de los cambios cualitativos del programa más que de los cuantitativos. Ahora bien, la evolución se traduce antes que nada en un aumento de la complejidad. Una bacteria representa la traducción de una secuencia nucleica de casi un milímetro de longitud y alrededor de veinte millones de signos. El hombre procede de otra secuencia nucleica de casi dos metros de longitud y varios miles de millones de signos. La complicación de la organización se corresponde, por lo tanto, con una prolongación del programa. Lo que ha posibilitado la evolución, una vez más, es la relación que se establece entre la estructura espacial del organismo y la secuencia lineal del mensaje genético. La complejidad de una integración se traduce así por la simplicidad de una adición. Sin embargo, los mecanismos conocidos de la genética favorecen las variaciones del programa sin aportar apenas suplementos.

Están los errores de copia que duplican segmentos del mensaje, los fragmentos genéticos transferidos por virus o los cromosomas supernumerarios. Pero estos procesos tienen poca incidencia. Difícilmente podrían ser los responsables únicos de algunas de las grandes etapas de la evolución: la transición de la organización celular simple, o «procariota», de las bacterias a la forma compleja, o «eucariota», de las levaduras y los organismos superiores, o la transición del estado unicelular al estado pluricelular, o la aparición de los vertebrados. Cada una de estas etapas se corresponde en efecto con un aumento notable del ácido nucleico. Para justificar estos incrementos bruscos hay que explotar el azar de algún evento raro, como un error de reproducción que comporta un exceso de cromosomas, o algún proceso excepcional como la simbiosis de organismos o la fusión de programas pertenecientes a especies distintas. La intervención de las simbiosis en la evolución queda demostrada por la existencia de las «mitocondrias», orgánulos encargados de producir la energía en las células complejas. Desde el punto de vista bioquímico, estos orgánulos llevan la marca de las bacterias. Poseen incluso su propio material genético, independiente de los cromosomas del núcleo celular. Todo indica que se trata de vestigios de bacterias que se asociaron en el pasado a otro organismo para formar el ancestro de nuestras células. En cuanto a las fusiones de programas, se conocen en las plantas, pero no en los animales. Un mecanismo de seguridad protege a estos últimos de los efectos de los «amores abominables» tan queridos de la antigüedad y la edad media. Recientemente se ha observado en cultivos de laboratorio la fusión de células procedentes de especies distintas, hombre y ratón por ejemplo. Las células híbridas, cada una de las cuales posee un programa genético doble, se multiplican perfectamente. Si estos encuentros excepcionales tuvieran consecuencias, ello bastaría para ocasionar cambios muy profundos. En la práctica, nada prueba que tales accidentes se den en la naturaleza; pero nada se opone a ello en teoría. Los incrementos del programa genético no muestran ninguna regularidad. Se observan saltos bruscos, aumentos repentinos, disminuciones inexplicables, sin ninguna correlación con la complejidad del organismo. Para adaptar los incrementos del programa al ritmo de la evolución se requieren eventos poco comunes. Puede que algún día las computadoras calculen las posibilidades que tenía el hombre de hacer su aparición sobre la Tierra, pero, hoy

por hoy, cualquier intento de estimar la probabilidad de evolución de una forma de vida concreta es ilusorio.

Lo que entraña esta ampliación del programa genético es la tendencia característica de la evolución a aumentar la gama de interacciones entre el organismo y el medio ambiente. Un organismo puede multiplicar los intercambios con su entorno de muchas maneras. Incluso los protozoarios lo hacen. Con su aparato de orgánulos especializados, presentan un grado de complejidad sorprendente para una sola célula. Pero el número y tamaño de las estructuras compatibles con la reproducción tiene un límite. Más allá de cierto umbral, es más rentable la multiplicación de las células y su diferenciación y especialización posterior. Si unas células se encargan de la alimentación, otras pueden ocuparse de la percepción, la locomoción o la integración. La diversificación y especialización de las células las libera de la carga que supone llevar a cabo *todas* las reacciones del organismo. Esto significa que tienen que hacer menos cosas, pero mejor, a condición de que sus actividades estén coordinadas. Para especializarse, las células deben comunicarse entre sí.

Las células se comunican por contacto directo y también por la mediación del sistema nervioso y las hormonas. Todavía se sabe poco de la naturaleza de las interacciones moleculares que intervienen en estos circuitos de regulación. Se empieza a «comprender» la célula, pero no así el tejido o el órgano. Se ignora la lógica del sistema que rige la ejecución de los programas complejos, como el desarrollo de un mamífero. La formación de un hombre a partir de un huevo representa una maravilla de rigor y precisión. La emergencia de billones de células a partir de una sola siguiendo un orden perfecto en el tiempo y en el espacio y diferenciándose en linajes especializados es algo que desafía la imaginación. Durante el desarrollo embrionario se traducen y ejecutan progresivamente las instrucciones contenidas en los cromosomas del huevo que determinan cuándo y dónde se forman los millares de especies moleculares que constituyen el cuerpo del adulto. El plan de desarrollo, la serie de operaciones que deben efectuarse, el orden y el lugar de las síntesis, su coordinación, todo ello está inscrito en el mensaje nucleico. En la ejecución del plan se producen muy pocos errores: la fidelidad del sistema se mide por la escasez de abortos y de monstruos.

Durante el desarrollo, cada célula recibe un juego completo de cromosomas. Pero las diferentes células producen distintos tipos de proteínas y mensajeros químicos según su especialización. Aunque contenga el programa entero, cada célula traduce sólo algunos fragmentos y ejecuta sólo algunas instrucciones. Existe, por lo tanto, una secuencia precisa de eventos químicos durante la cual la expresión misma de los genes se modifica a medida que se diferencian las células. La puesta en juego de circuitos de regulación activa o inhibe los segmentos del mensaje en cada linaje celular. Estos circuitos no sólo son más complejos en los organismos pluricelulares que en las bacterias, sino que responden a exigencias distintas. En primer lugar, porque tales organismos requieren sistemas capaces de activar diferencialmente baterías de genes, de forma permanente e irreversible. En segundo lugar, porque localizar un gen entre un millón requiere mecanismos más elaborados —elecciones sucesivas de subconjuntos, por ejemplo—. En tercer lugar, porque una bacteria y una célula de un organismo pluricelular trabajan en condiciones muy diferentes. La exigencia de la bacteria es mantener su equilibrio funcional adaptándose a distintos medios. La célula debe mantener igualmente un estado definido de equilibrio, pero también debe coordinar sus actividades con las de sus vecinas. Sólo así puede el órgano desempeñar sus funciones, que a su vez están sometidas al reglamento del organismo entero.

A fin de cuentas, es la lógica del organismo, su individualidad y su finalidad, la que rige el comportamiento de sus constituyentes y sus sistemas de comunicación. Sin embargo, en la red que coordina un conjunto de actividades químicas tan complejo como el de un mamífero hay mucho margen para los errores y las maniobras falsas. Algunas tienen poca importancia, pero otras tienen mucha. La multiplicación celular, por ejemplo, está sometida al control del organismo. Durante el desarrollo embrionario es rápida, pero cuando el organismo alcanza el estado adulto se detiene, y sólo se reanuda cuando hay alguna herida. El programa genético no sólo prescribe el plan de las divisiones celulares, sino que les impone un límite. Esta red de coordinación hace intervenir dos clases de circuitos: uno directo, por contacto, y otro indirecto mediado por hormonas. Pero en todos los casos la célula capta las señales por medio de receptores superficiales específicos. Cuando un receptor desaparece o deja de transmitirse una señal, se interrumpe uno de los circuitos que mante-

nían en sociedad a moléculas y células. Una célula puede derivar así hacia la anarquía, volviéndose sorda a las señales que limitan su crecimiento. La célula deja de formar parte de la comunidad y puede invadir los tejidos vecinos provocando un tumor. Con la noción de programa genético, las viejas polémicas sobre el origen del cáncer han perdido mucho de su sentido. Tanto si la lesión empieza en el núcleo como en el citoplasma, tanto si es consecuencia de una mutación somática como de la presencia de un virus o del desarreglo de un circuito, todo aquello que impide la recepción de una señal puede hacer que una célula se sustraiga a la ley de la comunidad. Comprender el cáncer equivale a acceder a la lógica del sistema que impone a las células las obligaciones del organismo.

Las complicaciones introducidas por la multiplicación y la diferenciación celulares son una exigencia del aumento de los intercambios entre el organismo y su entorno. La cicatrización de una lesión después de una herida, la regeneración de un miembro tras una amputación, significan ya una adecuación de las respuestas del organismo. La flexibilidad del programa permite hacer frente a ciertas formas de agresión. Pero lo que más se desarrolla en el curso de la evolución son los medios para recoger la información del exterior, tratarla y ajustar las reacciones del organismo en consecuencia. Bajo la presión de la selección natural se ensayan entonces todas las soluciones posibles. Hay organismos que palpan el medio y otros que lo oyen o lo ven o lo huelen. Paralelamente aumentan las maneras de reaccionar ante los estímulos y aumentan los grados de libertad en la elección de las respuestas. No basta con obtener algunas impresiones aquí o allá, hay que integrarlas y extraer consecuencias. La sensibilidad a la luz, por ejemplo, es muy interesante para los organismos, hasta el punto de que el ojo ha sido «inventado» varias veces a lo largo de la evolución. Aparte del ojo compuesto de los insectos, el ojo simple ha evolucionado de forma independiente al menos en tres ocasiones: en los moluscos, en las arañas y en los primeros vertebrados. Ahora bien, ¿para qué puede servir un instrumento de precisión capaz de reconocer una forma, de estimar una distancia, de precisar la dirección de un movimiento, si no es para localizar un predador o una presa, y para adecuar su respuesta a la situación? También hay que disponer de los medios para integrar las señales recibidas, compararlas con las formas

grabadas en una «memoria», distinguir el amigo del enemigo, nadar, correr o volar, «escoger» una reacción. Los poderes de percepción, de reacción y de decisión sólo pueden desarrollarse en armonía.

El incremento de los intercambios entre el organismo y el medio se sustenta en el desarrollo del sistema nervioso. Sin embargo, el conocimiento actual del sistema nervioso recuerda el de la herencia en el siglo XX. Se posee alguna información sobre ciertas propiedades eléctricas o bioquímicas de los nervios, pero se sabe poco acerca de la especificidad de las conexiones, de la organización de la red o de su construcción. Se ignora casi totalmente cómo se codifica, se transmite, se registra y se restituye la información o cuál es la lógica que subyace tras el funcionamiento del cerebro, de la memoria o del aprendizaje. Lo que parece seguro por lo menos es que, de alguna manera, la anatomía del sistema nervioso viene fijada por la herencia. La estructura del cerebro, al igual que la de los otros órganos, está determinada hasta el menor detalle por el programa genético. En muchas ratas mutantes, el cambio de un gen particular lleva consigo una cierta anomalía de comportamiento asociada a una lesión específica del cerebro. Observando la regeneración de nervios cortados en ciertos organismos, se constata que el recorrido de las fibras, el establecimiento de las conexiones, la constitución de los circuitos, en pocas palabras, la organización de la red, se efectúa de acuerdo con el plan original. En el cerebro de los mamíferos existen centros definidos no sólo para la recepción de las distintas sensaciones y la puesta en acción de los diferentes músculos, sino también para el sueño, los ensueños, la atención y hasta los estados afectivos. En la rata, por ejemplo, existe un centro del «dolor» y otro del «placer»: si se implantan electrodos en este último y se da a la rata la posibilidad de activarlo por sí misma, el animal puede entregarse al placer ¡hasta el agotamiento! Sin embargo, aún no se sabe cómo se superponen los circuitos adquiridos a la red heredada. Se ignora de qué modo se articulan lo innato y lo adquirido. De acuerdo con los etólogos, cuando un comportamiento pone en juego una parte adquirida por la experiencia, lo hace en función del programa genético. El aprendizaje se inserta en el cuadro fijado por la herencia. Pronto se podrá analizar el mecanismo molecular de la sinapsis, la articulación de las células nerviosas y la unidad de las conexiones anatómicas sobre las que descansa toda la configuración de la red nerviosa.

Podemos estar seguros de que las reacciones que caracterizan la actividad cerebral le parecerán al bioquímico tan banales como las de la digestión. Pero la descripción en términos fisicoquímicos de un movimiento de la conciencia, un sentimiento, una decisión, un recuerdo, ya es otra cosa. Nada nos dice que se vaya a conseguir alguna vez, no sólo por su complejidad, sino también porque, desde Gödel, se sabe que un sistema lógico nunca se basta para su propia descripción.

Con el desarrollo del sistema nervioso y, por ende, del aprendizaje y la memoria se atenúa el rigor de la herencia. En el programa genético que subyace tras las características de un organismo de cierta complejidad hay una parte cerrada cuya expresión está estrictamente fijada, y otra abierta que deja al individuo alguna libertad de respuesta. Por un lado, el programa prescribe con rigidez las estructuras, funciones y atributos; por otro, sólo determina potencialidades, reglas, marcos. En un caso impone, en el otro permite. El papel creciente de lo adquirido modifica el comportamiento del individuo. Así lo demuestran las distintas maneras que tienen las aves de reconocer a sus semejantes. En algunas, como el cuclillo, la identificación de la especie está determinada rigurosamente por el programa genético. La visión de formas y movimientos basta. Criado en un nido de padres adoptivos, gorriones o currucas, el joven cuclillo ya emancipado irá a buscar la compañía de otros cuclillos aunque no haya visto ninguno en su vida. En el ganso, por el contrario, dicha identificación es más flexible. Se realiza mediante el mecanismo que los etólogos llaman «impronta» (*imprinting*). Al romper el cascarón, el joven ganso sigue al primer objeto que ve moverse y cuyo reclamo escucha. Lo normal es que siga a su verdadera madre; pero si se trata de otro organismo, como Konrad Lorenz, el pequeño ganso lo considerará su madre y lo seguirá a todas partes. Así pues, lo que el programa genético determina es una forma en el primer caso y la aptitud para grabar la impronta de una forma en el segundo. En el mundo animal hay innumerables ejemplos de este tipo. Es la importancia creciente de la parte abierta del programa lo que imprime una dirección a la evolución. Al aumentar la capacidad de respuesta a los estímulos aumentan los grados de libertad del organismo en la elección de sus respuestas. En el hombre, el número de respuestas posibles es tan elevado que cabe hablar del «libre albedrío» tan querido de los filósofos. Sin embargo, la ductilidad tiene sus límites.

Incluso cuando el programa sólo confiere al organismo una capacidad, por ejemplo la de aprender, le impone restricciones sobre lo que puede aprender y sobre el momento y las circunstancias en que deberá hacerlo. El programa genético confiere al hombre la aptitud del lenguaje. Le da el poder de aprender, de comprender, de hablar cualquier lengua; pero para que esa potencialidad se realice debe encontrarse en un medio favorable en una cierta etapa de su crecimiento. Pasada cierta edad, privado durante demasiado tiempo del habla, de los cuidados y el afecto maternos, el niño ya no hablará. Lo mismo puede decirse de la memoria. Hay unos límites para la cantidad de información que puede registrarse, la duración del registro y la capacidad de recordar lo memorizado. Esta frontera entre la rigidez y la flexibilidad del programa apenas ha sido explorada.

Con el aumento de los intercambios en el curso de la evolución aparecen sistemas de comunicación que funcionan no dentro del organismo, sino entre organismos. De esta forma se establecen redes de relaciones entre individuos de una misma especie. En un principio, estos sistemas de comunicación están directamente ligados a la finalidad de la reproducción. Sin ellos la sexualidad no tendría ninguna eficacia. Mientras la reproducción sexual no es obligatoria, mientras continúa siendo una función auxiliar, nada favorece la unión de los sexos. En las bacterias no existe el *sex-appeal*. Los encuentros responden al azar de las colisiones entre individuos de sexo opuesto. Lo mismo ocurre con ciertos organismos inferiores, hermafroditas, que sólo recurren al sexo ocasionalmente. Pero a medida que los organismos ganan en autonomía y el ejercicio de la sexualidad se convierte en el único medio de reproducción, los individuos de un sexo necesitan reconocer a los del otro. De esta forma aparecen sistemas de comunicación que actúan a distancia para ligar selectivamente los sexos opuestos de una misma especie. Lo más corriente es la emisión por un sexo de señales específicas que son recibidas por el otro. Señales olfativas en ciertos insectos: se produce una sustancia volátil que es captada, identificada e interpretada por aquellos cuyo programa genético les ha dotado de un receptor sensible a esa molécula en concreto. Señales auditivas en otros insectos: solamente cantan los machos. Señales visuales en los peces y las aves: uno de los sexos, por lo general el macho, exhibe un atavío complejo de formas, colores, adornos tornasolados, que actúan como estímulos visuales para el otro sexo. Acopladas a

la química del organismo mediante hormonas, estas señales visuales activan la parte del comportamiento relacionada con la reproducción, desencadenando el cortejo de conductas que conduce a la cópula, la construcción del nido, la incubación, etc. Aun así, toda la secuencia de las operaciones que se efectúan, los ritos, el ceremonial, están inscritos en el mensaje genético. La vista del sexo opuesto desempeña el papel de una señal que se limita a desencadenar la ejecución de un plan preparado para la reproducción.

Es obvio que estos sistemas de señales fueron seleccionados para favorecer la reproducción, pero no son menos importantes como medios de comunicación entre individuos de la misma especie, sean del sexo que sean. Favorecen la formación de integrones de orden superior al organismo. Pero, fuera de los mamíferos, la integración raramente va más allá de la formación provisional de una pareja, la unidad reproductora. Excepcionalmente se constituyen grupos de comportamiento coordinado, como los bancos de peces o las bandadas de aves durante las migraciones. La principal excepción la encontramos en algunos insectos —hormigas, termitas y abejas— que constituyen verdaderos integrones de orden superior al del individuo. La vieja comparación de la sociedad con un organismo se materializa en el hormiguero, en el termitero y en la colmena, a pesar de lo cual cada una de estas estructuras constituye ante todo una unidad reproductora. La reina y los machos ejercen el papel de células sexuales, y las obreras el de células somáticas. Una vez más, el conjunto de estos sistemas está rígidamente determinado por programas genéticos que fijan no sólo la morfología y la fisiología de cada tipo, sino también la naturaleza y la serie de operaciones adjudicada a cada uno. Cuando el programa se abre y se establece un sistema de comunicación nuevo, como la danza de las abejas, es para transmitir la información necesaria a una función del sistema, en este caso la búsqueda de alimento.

La estructura de estas comunidades animales viene determinada por el mensaje genético. Con los mamíferos, sin embargo, el programa hereditario pierde su rigidez. Los órganos de los sentidos se agudizan. Los medios de acción aumentan, sobre todo con la prensión. La capacidad de integración aumenta con el cerebro. Incluso aparece una propiedad nueva: el poder de liberarse de la adherencia a los objetos, de interponer una

suerte de filtro entre el organismo y el medio, de simbolizar. Un roedor puede aprender a distinguir un triángulo de un cuadrado o un círculo asociando su forma a la obtención de alimento. Un gato puede aprender a contar estímulos. Un chimpancé, aunque sea incapaz de hablar con su laringe, puede aprender, al menos en parte, el código de señales gestuales que utilizan los sordomudos para comunicarse. De esta forma llegan a reconocer toda una serie de signos, a interpretarlos, imitarlos, incluso combinarlos para construir «frases» cortas y expresarse. Así pues, la pequeña región del cerebro que rige el gesto y la palabra no se desarrolló tampoco de golpe, por un salto brusco. Pero tampoco el hombre ha llegado a ser lo que es a través de una cadena continua, de una serie única de etapas, sino a través de un mosaico de cambios en los que cada órgano, cada sistema de órganos, cada grupo funcional, evolucionó con una marcha y una velocidad propias. Prolongación de la vida fetal y desarrollo lento, locomoción bípeda y liberación de los miembros anteriores, mano y uso de utensilios, incremento cerebral y aptitud lingüística, todo esto conduce no sólo a una mayor autonomía en relación al medio, sino también a nuevos sistemas de comunicación, de regulación, de memoria, que funcionan a un nivel superior al del organismo. Se reúnen así todas las condiciones para nuevas integraciones en las que la coordinación de los elementos se basa no ya en la interacción molecular, sino en el intercambio de mensajes cifrados. De este modo se constituye una nueva jerarquía de integrones: de la organización familiar al Estado moderno, de la etnia a la coalición de naciones, toda una serie de integraciones fundamentadas en una variedad de códigos culturales, morales, sociales, políticos, militares, religiosos, etc. La historia humana se identifica básicamente con la historia de estos integrones, sus formaciones, sus cambios. Aquí también se perfila una tendencia a la integración creciente que permite el desarrollo de los medios de comunicación. Mientras ésta se reduce al habla, la transferencia de información está limitada en el espacio y en el tiempo. Con la escritura, la comunicación puede liberarse del tiempo y la experiencia pasada de los individuos puede acumularse en una memoria colectiva. Con las técnicas electrónicas que permiten conservar la imagen y el sonido y transmitirlos instantáneamente a cualquier punto del globo, desaparece toda restricción espaciotemporal.

En los integrones culturales y sociales aparecen objetos nuevos. Estos funcionan según principios desconocidos en los niveles inferiores. Los conceptos de democracia, de propiedad, de salario, están tan desprovistos de significado para una célula o un organismo como los de reproducción o selección natural para una molécula aislada. La biología se diluye así en el estudio del hombre del mismo modo que la física en el de la célula. La biología representa una vía de acceso más. Desde los albores de la teoría de la evolución, y en especial desde Herbert Spencer, se ha querido interpretar muchas veces los integrones sociales o culturales, sus variaciones y sus interacciones, con el apoyo de modelos exclusivamente biológicos. Dado que los mecanismos que rigen la transferencia de información obedecen a ciertos principios, la transmisión de una cultura a través de las generaciones puede contemplarse como una suerte de segundo sistema genético superpuesto al de la herencia. Resulta entonces tentador, especialmente para los biólogos, comparar los procesos en juego en uno y otro ámbito en busca de sus analogías; relacionar la aparición de una idea con la de una mutación; oponer la novedad del cambio al conservadurismo de la copia; explicar la desaparición de sociedades o culturas por la de las especies que se internan en callejones evolutivos sin salida. Si el paralelismo se lleva hasta el detalle, entonces la reproducción se encuentra en el centro de los dos sistemas, tanto para los códigos culturales y sociales como para la estructura de los organismos y sus propiedades: la fusión de culturas recuerda la de los gametos; la universidad ejerce en la sociedad el papel de la estirpe germinal en la especie; las ideas invaden los espíritus del mismo modo que los virus las células; éstas se multiplican y seleccionan según las ventajas que confieren al grupo. En resumen, la variación de las sociedades y las culturas se basa en una evolución parecida a la de las especies. Sólo falta definir los criterios de selección. El problema es que nadie lo ha logrado.

Los objetos que constituyen los integrones culturales y sociales, con sus códigos, regulaciones e interacciones, desbordan los esquemas explicativos de la biología. Una vez más, se trata de integraciones de elementos ya integrados. Pero, si bien vuelven a observarse discontinuidades de fenómenos y de conceptos, no se encuentra ruptura alguna con los niveles de la biología. Los objetos de observación encajan unos en otros. La fisiología, por ejemplo, considera individualmente las funciones del

organismo y los mecanismos que las coordinan. Por encima de ella, la ciencia del comportamiento hace abstracción de los procesos internos para captar en su totalidad la reacción del organismo en su medio. Más allá todavía, la dinámica de las poblaciones y la sociología ignoran el comportamiento de los individuos y toman el del conjunto como objeto de análisis. Algún día será preciso asociar los distintos niveles de observación para referir cada uno a los otros. Una vez más, no se puede esperar comprender el sistema sin conocer las propiedades de los elementos. Si bien el estudio del hombre y de sus sociedades no puede reducirse a la biología, tampoco puede ignorarla; como tampoco la física. No se puede dar cuenta de las transformaciones culturales y sociales sólo por la selección de las ideas. Pero tampoco se puede olvidar que el organismo humano es el producto de la selección natural. De todos los organismos, el hombre es el que posee un programa genético más abierto y flexible. Ahora bien, ¿hasta dónde llega esta flexibilidad? ¿Cuál es la parte del comportamiento prescrita por los genes? ¿A qué restricciones innatas está sometido el espíritu humano? Estas restricciones ciertamente existen en algunos niveles, ¿pero dónde está el límite? Para la lingüística moderna existe una gramática básica, común a todas las lenguas; esta uniformidad reflejaría un marco impuesto por la herencia a la organización cerebral. Para los neurofisiólogos el sueño constituye una función necesaria no sólo para el hombre, sino para todos los mamíferos, y está regido por un centro localizado en una región precisa del cerebro. Para los etólogos la agresividad constituye una forma de comportamiento seleccionada en el curso de la evolución. Presente en la mayoría de vertebrados, confería una ventaja selectiva al hombre cuando aún vivía en grupos pequeños y tenía que competir constantemente por el alimento, las mujeres y el poder. Hoy día ya no es la selección natural la que ejerce el papel principal en las transformaciones humanas, por lo menos en algunas sociedades. Es la cultura, más eficaz, más rápida, pero también más reciente. En consecuencia, muchos aspectos del comportamiento actual del hombre emanan de alguna ventaja selectiva conferida a la especie en su origen. Muchos rasgos de la naturaleza humana deben insertarse en el marco fijado por los veintitrés pares de cromosomas que constituyen el patrimonio hereditario del hombre. Ahora bien, ¿cuál es la rigidez de este

marco? ¿Cuáles son las restricciones que impone el programa genético a la plasticidad del espíritu humano?

Con la acumulación de conocimientos, el hombre ha llegado a ser el primer producto de la evolución capaz de controlar la propia evolución. No solamente la de las otras especies, favoreciendo las que le interesan y eliminando las que le molestan, sino también la suya propia. Quizás un día se pueda intervenir en la ejecución del programa genético y en su estructura para corregir algunos defectos y para introducir suplementos. Quizá también se llegue algún día a producir a voluntad tantas copias exactas como se desee de un individuo: un político, un artista, una reina de la belleza o un atleta, por ejemplo. Nada impide aplicar a los seres humanos los procedimientos de selección utilizados para los caballos de carrera, las ratas de laboratorio o las vacas lecheras. Todavía habría que conocer los factores genéticos que intervienen en cualidades tan complejas como la originalidad, la belleza o la resistencia física; y, sobre todo, sería necesario ponerse de acuerdo sobre qué criterios deberían aplicarse. Pero éste es un problema que ya no concierne sólo a la biología.

Existe una coherencia en las descripciones de la ciencia, una unidad explicativa que es consecuencia de la unidad subyacente de las entidades y los principios en juego. Sea cual fuere el nivel considerado, los objetos de análisis son siempre organizaciones y sistemas. Cada uno de ellos sirve de ingrediente al siguiente. Incluso el átomo, el gran irreductible, se ha convertido en un sistema. Los físicos no pueden todavía afirmar si la más pequeña de las entidades conocidas en la actualidad es o no una organización. La palabra evolución sirve para describir los cambios que acontecen entre sistemas; porque lo que evoluciona no es la materia, confundida con la energía en una misma permanencia, sino la organización, la unidad de emergencia siempre capaz de unirse a sus semejantes para integrarse en un sistema que la domina. Sin esta propiedad el universo sería de una monotonía absoluta: un océano de granos idénticos, inertes, que se ignoran mutuamente; un poco como las rocas más viejas de la Tierra, en las que durante miles de millones de años no han cambiado ni las moléculas ni sus relaciones.

La integración es lo que cambia la calidad de las cosas. Una organización suele poseer propiedades que no existen en el nivel inferior. Estas propiedades pueden explicarse por las de los constituyentes, pero no se

deducen de ellas. Un integrón particular sólo tiene una cierta probabilidad de aparecer. Cualquier previsión referente a su existencia sólo puede ser de orden estadístico. Esto vale tanto para la formación de los seres vivos como para la de las cosas; tanto para la constitución de una célula, de un organismo o de una población como para la de una molécula, una piedra o una borrasca. La unidad de explicación se sustenta hoy en la contingencia. En los organismos, sin embargo, los efectos del azar se compensan inmediatamente por las necesidades de la adaptación, de la reproducción, de la selección natural, lo que conduce a una paradoja. En el mundo inanimado puede predecirse estadísticamente con precisión el azar de los sucesos. En los seres vivos, por el contrario, indisolublemente ligados a una historia que desconocemos en sus detalles, las desviaciones introducidas por la selección natural impiden toda predicción. ¿Cómo puede preverse la aparición y expansión de ciertas formas vivas y no otras? ¿Cómo predecir el final precipitado de los grandes reptiles de la era secundaria y el triunfo inminente de los mamíferos?

Al fin y al cabo, la existencia misma de todas las organizaciones, todos los sistemas y todas las jerarquías, depende de las propiedades de los átomos descritas por las leyes del electromagnetismo de Maxwell. Puede que existan otras coherencias posibles en las descripciones; pero, encerrada en su sistema de explicaciones, la ciencia no puede evadirse del mismo. En el momento presente el mundo es mensaje, código, información. ¿Qué disección desmembrará mañana nuestros objetos para recomponerlos en un nuevo espacio? ¿Qué nueva muñeca rusa surgirá de ello?



FRANÇOIS JACOB (Nancy, 1920 - París, 2013) fue un biólogo francés, galardonado con el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1965, el cual compartió con André M. Lwoff y Jacques L. Monod, por sus descubrimientos sobre el control genético de la síntesis de enzimas y la síntesis de virus.

Fue estudiante de Medicina en París hasta que, en 1940, la guerra interrumpió sus estudios y le obligó a refugiarse en Inglaterra, donde se enroló en el Ejército de Liberación francés. Combatió en África, donde resultó herido; participó después en el desembarco de Normandía, por lo que fue condecorado con la Croix de la Libération.

En 1947 se doctoró, por fin, en Medicina, pero no pudo ejercer como cirujano como hubiera sido su deseo, por las secuelas de sus heridas de guerra. Se dedicó, pues, a la biología, ingresó en el Instituto Pasteur y trabajó con André Lwoff en la investigación sobre bacterias y bacteriófagos. Posteriormente, profundizó en problemas de genética bacteriana, al

dedicarse a estudiar los mecanismos de su reproducción (*Sexuality and the genetics of Bacteria*, 1961).

En 1958, comenzó a colaborar con Jacques Monod en investigaciones sobre los mecanismos de transmisión de la información genética, y junto con él, introdujo entre otros, los conceptos de RNA mensajero y de genes reguladores que, en la célula, controlan la síntesis de las proteínas.

Escribió *Lógica de lo viviente. Historia de la Biología* (*La logique du vivant*, 1970), un interesante análisis histórico sobre el concepto de herencia. En *La estatua interior* (*La statue intérieure,* 1986), narra su formación cultural y humana.

# LA LOGICA DE LO VIVIENTE

## Una visión materialista de la biología

## FRANÇOIS JACOB

¿Puede escribirse una Historia de la Biología sin recurrir a los esquemas clásicos de los historiadores? Jacob demuestra en este libro que la Historia de la Biología no es únicamente una acumulación de resultados experimentales que llevan del conocimiento del error a la verdad.
El autor rechaza en esta obra la concepción idealista de la Historia de la Biología: las largas listas de científicos, los acontecimientos históricos que marcaron las diversas épocas y los "azares" que determinaron los descubrimientos, en cambio, convierte la Historia de la Biología en la imagen de una lucha por la experimentación científica. Con esta particular visión el autor sienta las bases de la historia materialista de una ciencia.
François Jacob fue Premio Nobel de Medicina en 1965. Actualmente es profesor de genética en el *College de France* y director de investigación en el Instituto Pasteur de París.

